

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Energetica

RELAZIONE FINALE

**SOFTWARE DI SIMULAZIONE ENERGETICA
DEGLI EDIFICI E LORO VALIDAZIONE**

Relatore: Prof. Roberto Zecchin
Correlatore: Ing. Giuseppe Emmi
Dipartimento di Fisica Tecnica

Laureando: Marco Binotto

ANNO ACCADEMICO 2009 - 10

INDICE

INDICE.....	I
INDICE DELLE FIGURE.....	III
INDICE DELLE TABELLE.....	VII
 1 INTRODUZIONE.....	 1
1.1 NORMATIVA ITALIANA E SUOI LIMITI.....	2
 2 I SOFTWARE DI SIMULAZIONE.....	 5
2.1 CLASSIFICAZIONE.....	5
2.2 CENNI SULLA COMPLESSITÀ DEI FENOMENI DA ANALIZZARE.....	7
2.2.1 <i>Conduzione termica in regime transitorio</i>	9
2.2.2 <i>Irraggiamento interno ad elevata lunghezza d'onda</i>	10
2.2.3 <i>Irraggiamento esterno ad elevata lunghezza d'onda</i>	10
2.2.4 <i>Irraggiamento a bassa lunghezza d'onda</i>	10
2.2.5 <i>Ombreggiature</i>	11
2.2.6 <i>Flussi d'aria</i>	12
2.2.7 <i>Guadagni gratuiti</i>	13
2.2.8 <i>Impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC systems)</i>	14
2.2.9 <i>Controllo</i>	15
2.3 GENERALITÀ SULLA MODELLAZIONE.....	16
2.3.1 <i>Metodo diretto</i>	16
2.3.2 <i>Metodo inverso</i>	17
2.3.3 <i>Panoramica sui principali metodi d'analisi energetica</i>	20
 3 LA VALIDAZIONE.....	 23
3.1 METODOLOGIA DI VALIDAZIONE.....	23
3.1.1 <i>Principali estrapolazioni adottate</i>	27
3.1.2 <i>Metodologia globale di validazione</i>	28
3.2 NECESSITÀ NORMATIVA DI VALIDARE UN CODICE.....	29
 4 STANDARD DI VALIDAZIONE.....	 31
4.1 PANORAMICA SUI PRINCIPALI STUDI DI VALIDAZIONE.....	31
4.1.1 <i>Verifica analitica</i>	31
4.1.2 <i>Verifica empirica</i>	31
4.1.3 <i>Verifica comparativa</i>	35
4.1.4 <i>Tabella riassuntiva</i>	36
4.2 VALIDAZIONE SECONDO NORME UNI EN.....	37
4.2.1 <i>Norme per la validazione dei metodi di simulazione dell'intero edificio</i>	37

4.3	VALIDAZIONE SECONDO IEA BESTEST	40
4.3.1	IEA ENVELOPE BESTEST	40
4.3.2	IEA Ground Coupled BESTEST.....	58
4.3.3	HVAC BESTEST: Cases E100-E200	76
4.3.4	HVAC BESTEST: Cases E300-E545	87
4.3.5	IEA RADTEST.....	100
5	CONCLUSIONI.....	113
6	ACRONIMI.....	117
7	BIBLIOGRAFIA.....	119

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1 - Effetti dell'inerzia sull'onda termica (Fonte: adattamento da Medola, 2006)</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2 - Flussi energetici in un edificio (Fonte: Hand J W, 1998)</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3 - Propagazione della radiazione solare su superfici vetrate</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4 - Fattori che influenzano la distribuzione dei flussi d'aria negli edifici (Fonte: Tuomaala, 2002)</i>	<i>13</i>
<i>Figura 5 - Approcci risolutivi sequenziale e simultaneo (Fonte: Bush, 1996)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6 - Struttura di un software di simulazione energetica degli edifici (Fonte: ASHRAE, 2005)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7 - Schema di rete neurale FeedForward (Fonte: Neto e Fiorelli, 2008)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8 - Tecniche di validazione analitica, empirica, comparativa (Fonte: Judkoff, et al., 2008)</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9 - Metodo di validazione (Fonte: Judkoff, R. e J. Neymark, 2006)</i>	<i>28</i>
<i>Figura 10 - Stanza di riferimento per la validazione secondo norme UNI EN (Fonte: UNI EN ISO 13792)</i>	<i>38</i>
<i>Figura 11 - BESTEST: geometria base, finestre a sud senza ombreggiatura (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)</i>	<i>44</i>
<i>Figura 12 - BESTEST: sezione dell'edificio con oggetto ombreggiante le finestre a sud (Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)</i>	<i>44</i>
<i>Figura 13 - BESTEST: vista assonometrica con finestre ombreggiate ad est e ad ovest (Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 14 - BESTEST: vista in pianta con finestre ombreggiate ad est e ad ovest (Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 15 - BESTEST: vista in pianta e in sezione della zona tampono soleggiata (Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)</i>	<i>46</i>
<i>Figura 16 - BESTEST: diagnostica per i casi con bassa massa termica</i>	<i>49</i>
<i>Figura 17 - BESTEST: diagnostica per i casi con bassa massa termica</i>	<i>50</i>
<i>Figura 18 - BESTEST: diagnostica per i casi con elevata massa termica</i>	<i>51</i>
<i>Figura 19 - BESTEST: diagnostica per i casi con elevata massa termica</i>	<i>52</i>
<i>Figura 20 - BESTEST: Casi a bassa massa termica, riscaldamento annuale</i>	<i>55</i>
<i>Figura 21 - BESTEST: Casi a bassa massa termica, raffrescamento annuale</i>	<i>55</i>
<i>Figura 22 - BESTEST: Casi ad alta massa termica, riscaldamento annuale</i>	<i>56</i>
<i>Figura 23 - BESTEST: Casi ad alta massa termica, raffrescamento annuale</i>	<i>56</i>

<i>Figura 24 - BESTEST: Casi a temperatura flottante, media della temperatura annuale su base oraria.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 25 - BESTEST: Casi con accoppiamento verso terra, riscaldamento e raffrescamento annuale.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 26 - GC BESTEST: risultati raggiunti dall'IEA SHC Task 22 (Fonte: [21])</i>	<i>59</i>
<i>Figura 27 - GC BESTEST: geometria con condizioni al contorno, caso GC30b (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 28 - GC BESTEST: dettagli sulla geometria al bordo, caso GC30b (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 29 - GC BESTEST: geometria con specifiche dimensionali, caso GC30b (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 30 - GC BESTEST: geometria caso analitico, GC10a (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)</i>	<i>67</i>
<i>Figura 31 - GC BESTEST: conduzione termica in regime periodico, prima delle correzioni (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)</i>	<i>69</i>
<i>Figura 32 - GC BESTEST: conduzione termica in regime periodico, dopo le correzioni (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)</i>	<i>69</i>
<i>Figura 33 - GC BESTEST: conduzione termica in regime stazionario, prima delle correzioni (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 34 - GC BESTEST: conduzione termica in regime stazionario, dopo le correzioni (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 35 - GC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi della serie "a" (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 36 - GC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi della serie "b" (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 37 - GC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi della serie "c" (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 38 - HVAC BESTEST: schema impianto di climatizzazione, casi E100-E200 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2002).....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 39 - HVAC BESTEST: coefficiente correttivo per funzionamento a carico variabile (Fonte: Neymark e Judkoff, 2002).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 40 - HVAC BESTETS: problema con variabile a semplice precisione in TRNSYS-TUD (Fonte: Neymark e Judkoff, 2002).....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 41 - HVAC BESTEST: COP prima della correzione degli errori, tramite diagnostica BESTEST (Fonte: Neymark et al., 2002)</i>	<i>83</i>

<i>Figura 42 - HVAC BESTEST: COP dopo la correzione degli errori, tramite diagnostica BESTEST (Fonte: Neymark et al., 2002).....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 43 - HVAC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi in regime stazionario (E100-E200) (Fonte: Neymark e Judkoff, 2002)</i>	<i>86</i>
<i>Figura 44 - HVAC BESTEST: geometria del caso base E300 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)..</i>	<i>87</i>
<i>Figura 45 - HVAC BESTEST: schema impianto di climatizzazione, casi E100-E200 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 46 - HVAC BESTEST: totale consumo elettrico, prima della diagnostica BESTEST (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004).....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 47 - HVAC BESTEST: totale consumo elettrico, dopo la diagnostica BESTEST (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004).....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 48 - HVAC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi in regime dinamico (300-E440) (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004).....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 49 - HVAC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi in regime dinamico (E500-E545) (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004).....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 50 - RADTEST: vista in sezione dell'edificio di riferimento.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 51 - RADTEST: geometria dettagliata dell'impianto radiante</i>	<i>102</i>
<i>Figura 52 - RADTEST: panoramica dei risultati, casi 800 - 1830 (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003).....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 53 - RADTEST: panoramica dei risultati, casi 1840 - 2810 (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003).....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 54 - RADTEST: temperatura massima della superficie radiante, dal caso 1840 al 2810 (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003).....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 55 - RADTEST: temperatura massima della superficie radiante, "delta results" (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003).....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 56 - RADTEST: temperatura dell'acqua di ritorno del circuito, caso dettagliato 2810 (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003).....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 57 - Diagramma sulle scelte progettuali che portano all'esecuzione o meno delle simulazioni (Fonte: Wilde e Prickett, 2009).....</i>	<i>115</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1 - Evoluzione dei software (Fonte: Clarke, 2001).....</i>	<i>6</i>
<i>Tabella 2 - Classificazione dei metodi per l'analisi energetica degli edifici (Fonte: ASHRAE 2005)</i>	<i>21</i>
<i>Tabella 3 - Tecniche di validazione (Fonte: Neymark, J. e R. Judkoff, 2002).....</i>	<i>24</i>
<i>Tabella 4 - Tipi di estrapolazioni (Fonte: adattamento da Neymark, J. e R. Judkoff, 2002).....</i>	<i>27</i>
<i>Tabella 5 - Panoramica sulle procedure di validazione (Fonte: adattamento da Judkoff e Neymark, 2009 & Judkoff, 2008 & Neymark et al., 2006).....</i>	<i>36</i>
<i>Tabella 6 - Panoramica sui parametri usati nei vari casi di validazione (Fonte: Zweifel, 2007)...</i>	<i>38</i>
<i>Tabella 7 - Classificazione dei metodi di calcolo (Fonte: UNI EN 15255).....</i>	<i>39</i>
<i>Tabella 8 - Sottoclassificazione dei metodi di calcolo (Fonte: UNI EN 15255).....</i>	<i>39</i>
<i>Tabella 9 - BESTEST: descrizione dei test di diagnostica con bassa massa termica (Fonte: Judkoff e Neymark, 1995).....</i>	<i>42</i>
<i>Tabella 10 - BESTEST: descrizione dei test di qualificazione e dei test realistici di diagnostica (Fonte: Judkoff e Neymark, 1995).....</i>	<i>43</i>
<i>Tabella 11 - Panoramica risultati ENVELOPE BESTEST</i>	<i>53</i>
<i>Tabella 12 - BESTEST: risultati di riferimento - riscaldamento annuale dei casi test di qualificazione.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabella 13 - BESTEST: risultati di riferimento - raffrescamento annuale dei casi test di qualificazione.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabella 14 - GC BESTEST: descrizione casi test serie, "a" e "b" (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>63</i>
<i>Tabella 15 - GC BESTEST: descrizione casi test, serie "c" (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)</i>	<i>64</i>
<i>Tabella 16 - GC BESTEST: geometria caso analitico, GC10a (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>67</i>
<i>Tabella 17 - GC BESTEST: intervalli di discordanza tra i risultati finali (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>69</i>
<i>Tabella 18 - GC BESTEST: riassunto sui problemi individuati con la diagnostica BESTEST (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008).....</i>	<i>71</i>
<i>Tabella 19 - HVAC BESTEST: descrizione casi test E100-E200 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2002)</i>	<i>79</i>
<i>Tabella 20 - HVAC BESTEST: panoramica sui bug individuati e corretti, casi E100-E200 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2002).....</i>	<i>82</i>

<i>Tabella 21 - HVAC BESTEST: intervalli di discordanza sui risultati di simulazione (Fonte: Neymark e Judkoff, 2002).....</i>	<i>85</i>
<i>Tabella 22 - HVAC BESTEST: descrizione casi test E300-E545 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)</i>	<i>89</i>
<i>Tabella 23 - HVAC BESTEST: carichi interni, caso E300 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)</i>	<i>90</i>
<i>Tabella 24 - HVAC BESTEST: prestazioni a pieno carico dell'impianto (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)</i>	<i>91</i>
<i>Tabella 25 - HVAC BESTEST: panoramica sui bug individuati e corretti, casi E300-E545 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004).....</i>	<i>96</i>
<i>Tabella 26 - RADTEST: descrizione qualitativa dei casi test (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)</i>	<i>105</i>
<i>Tabella 27 - RADTEST: descrizione dei casi test (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003).....</i>	<i>106</i>
<i>Tabella 28 - Riassunto correzioni dovute all'IEA 34 / 43 (Fonte: Judkoff e Neymark, 2009).....</i>	<i>114</i>

1 INTRODUZIONE

Con questa trattazione si vuole introdurre il lettore al mondo dei software di simulazione energetica del sistema edificio-impianto; a tal fine si è cercato di mantenere un approccio semplificato così da rendere più semplice l'avvicinamento a questa materia complessa e oramai sempre più comune.

Il lavoro seguente, dopo una breve introduzione sull'attuale normativa italiana, si compone in tre parti fondamentali.

Nella prima parte, si andranno ad identificare e definire i principali fenomeni fisici che interagiscono tra loro per formare le condizioni climatiche interne agli edifici. Si forniscono inoltre alcune sottolineature sulla complessità e l'eterogeneità dei fenomeni correlati dal medesimo principio fisico, e che dovranno essere simulati dai software di analisi energetica. In seguito, mantenendo una visione dall'alto, si andranno a precisare le diverse tecniche di modellazione che vengono implementate al calcolatore per predire, in maniera più o meno dettagliata, il fabbisogno energetico dell'edificio o il benessere termo igrometrico negli ambienti; oppure finalizzate al dimensionamento dell'impianto, o alla ricerca di un modello matematico che descrive, nella maniera più veritiera possibile (compatibilmente con la potenza di calcolo degli attuali strumenti informatici), il sistema edificio-impianto reale o immaginario, cosicché da rendere possibili anche i più complessi studi di valutazione energetico - economica.

Nella seconda parte, si va a focalizzare l'attenzione sulla verifica di tali strumenti di simulazione energetica, ovvero si definisce il concetto di validazione, le varie tipologie (confrontandone i principali vantaggi e svantaggi), si andranno poi ad osservare le principali fonti di errore che intercorrono nel processo di validazione stessa e le semplificazioni / estrapolazioni / ipotesi adottate. A conclusione di questa parte si fornisce una panoramica sugli adempimenti normativi in merito al processo di validazione, sia su scala europea che internazionale, a cui devono soddisfare i software di simulazione energetica per poter esser impiegati.

La terza parte, espone in maniera semplificata i principali studi di validazione, che in conclusione vengono riassunti in una tabella riepilogativa. In seguito vengono analizzate in maniera più dettagliata alcune tra le predette procedure. Questa parte si suddivide in due macro aree: la validazione secondo norme UNI EN, e quella proposta dall'International Energy Agency (IEA) denominata BESTEST. Per quanto concerne la seconda, si è optato per l'esposizione di quattro tra i numerosi progetti IEA: due inerenti gli scambi termici tra l'involucro edilizio e l'esterno, e i rimanenti si concentrano sulla validazione dei modelli di simulazione degli impianti di climatizzazione degli ambienti interni.

1.1 Normativa italiana e suoi limiti

Il problema del risparmio energetico si pose all'attenzione del mondo occidentale nel 1973, all'indomani della guerra israeliani-arabi in seguito alla quale gli arabi cercarono di condizionare il comportamento delle nazioni occidentali limitando le forniture di petrolio grezzo. Successivamente il problema venne riproposto in termini ben più preoccupanti nella prospettiva di esaurimento delle fonti primarie tradizionali, la preoccupazione per l'impiego di energia nucleare, le conseguenze inquinanti sull'ambiente per effetto degli scarichi di combustione.

La legge 373 del 30-04-1976 si preoccupò, in particolare, di determinare limitazioni nei consumi energetici nel riscaldamento degli ambienti, imponendo che l'involucro edilizio assicurasse il minimo possibile di dispersione di calore verso l'esterno.

Con la legge 10 del 09-01-1991 l'approccio al problema del risparmio energetico è stato di diversa natura, pur se nell'analogo obiettivo di indurre l'utente a limitare i consumi energetici per le proprie esigenze di riscaldamento ambientale. In pratica, le osservazioni vanno concentrate su quello che è il fabbisogno d'energia dell'utente nell'arco di un intero esercizio annuale, portando in conto non solo gli effetti dell'isolamento, ma anche gli apporti gratuiti che contribuiscono al riscaldamento ambientale.

In seguito alla direttiva europea 2002/91/CE del 16-12-2002 sul rendimento energetico in edilizia (*Energy Performance of Buildings Directive*)¹, in vigore da gennaio 2006, si è visto un rinnovamento legislativo che ha portato alla promulgazione a livello nazionale del decreto legislativo 192 del 19-08-2005, (successivamente integrato e corretto dal decreto legislativo del 29-12-2006, n.311 e relativi decreti attuativi).

La *ratio* dell'EPBD, come si legge all'art.1, è quella di *“promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici nella Comunità, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni per quanto riguarda il clima degli ambienti interni e l'efficacia sotto il profilo dei costi”*; a conferma della maggiore attenzione verso una più efficace integrazione dell'edificio nell'ambiente circostante a cui vuol spingere i progettisti europei, il punto 8 delle considerazioni iniziali richiede che *“tenuto conto delle condizioni climatiche del luogo e nel rispetto del benessere degli occupanti, l'edificio ed i relativi impianti [...] devono essere progettati e realizzati in modo da richiedere, in esercizio, un basso consumo di energia”*.

Se progettato secondo un corretto approccio riconducibile ai principi dell'architettura sostenibile, l'involucro edilizio dovrebbe, rispetto al problema termico invernale disperdere poco calore e captare energia solare nelle ore diurne e nei periodi caldi; al contrario, è chiamato a respingere, nel periodo estivo, la radiazione solare e cedere calore, quando necessario. A differenza di climi tipicamente più freddi, come quelli dell'Europa centro-settentrionale, il clima temperato dell'Europa meridionale propone la sfida, sotto questo aspetto, più difficile: progettare soluzioni che sappiano rapportarsi bene tanto con il freddo quanto con il caldo.

¹ Consultabile all'indirizzo <http://eur-lex.europa.eu> – Gazzetta Ufficiale L1/65 del 4 Gennaio 2003

Più ricerche sono state svolte² al fine di valutare le prestazioni degli edifici e dei loro materiali al variare dell'inerzia termica. L'inerzia termica rappresenta la capacità dei materiali di attenuare (*smorzamento*) e ritardare (*sfasamento*) l'ingresso in ambiente dell'onda termica dovuta alla radiazione solare incidente sull'involucro edilizio. Questa capacità dipende dallo spessore del materiale, dalla capacità termica e dalla conduttività. In altri termini, l'inerzia termica accumula il calore nella massa dell'edificio per poi cederlo, progressivamente. In questo modo si determina, all'interno dell'edificio, uno sfasamento ed una riduzione delle fluttuazioni e dei picchi che caratterizzano la temperatura esterna.

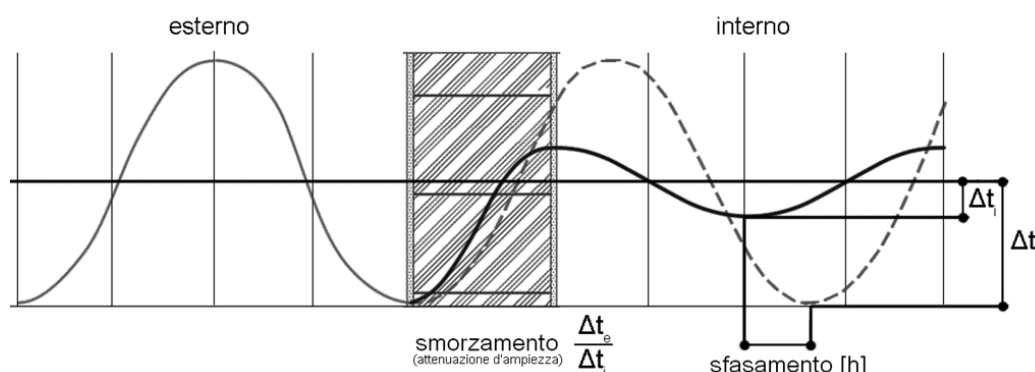


Figura 1 - Effetti dell'inerzia sull'onda termica (Fonte: adattamento da Medola, 2006)

L'uso consapevole della massa ha un notevole effetto positivo sulle condizioni di comfort, sui consumi energetici (fino al 30% inferiori rispetto a soluzioni “struttura-isolamento”) [4] e sui carichi per il raffrescamento, in particolare quelli di picco, che costituiscono uno dei motivi dei blackout estivi. Nel valutare i costi energetici, bisogna pertanto considerare sia i consumi complessivi, sia i carichi massimi, che determinano il dimensionamento degli impianti di climatizzazione. La massa non costituisce di per sé una soluzione applicabile indiscriminatamente per migliorare automaticamente le prestazioni energetiche. L'uso di un involucro pesante sottintende una conoscenza profonda delle proprietà dinamiche delle chiusure ed è una soluzione che si sposa felicemente con le strategie di raffreddamento passivo richiamate anche dall'EPBD nella nota iniziale n.18.

La direttiva europea, in questa nota, ricorda che negli ultimi anni nei paesi del sud Europa si è assistito ad un maggior ricorso ad impianti per la climatizzazione dell'aria ponendo così gravi problemi di carico massimo³. In questi paesi dovrebbe essere data priorità al rispetto dei consumi energetici per il raffrescamento anziché per il riscaldamento, magari ricorrendo anche a tecniche di raffreddamento passive.

Con riferimento alla climatizzazione estiva, i D.Lgs 192/05 e 311/06 impongono (solo per alcune zone climatiche e destinazioni d'uso) l'adozione di determinate soluzioni d'involucro senza che si

² Tra le ricerche scientifiche sviluppate in quest'ambito ricordiamo quelle descritte dal periodico “Costruire In Laterizio” consultabili all'indirizzo www.laterizio.it/costruire

³ Negli anni 2006 e 2008 il picco di potenza estiva si è manifestato superiore a quello invernale. Venerdì 20 luglio 2007, con 56.6 MW, è stata registrata la nuova punta massima estiva in potenza, nello stesso giorno si è realizzato altresì il massimo storico della richiesta giornaliera di energia elettrica (Fonte: TERNA).

richieda peraltro alcun calcolo. In particolare, fissare un unico limite, uguale per tutte le località alla massa superficiale (parametro semplice da calcolare ma poco significativo) dei componenti opachi appare come una prescrizione semplicista, in quanto non pesa l'effetto che i vari parametri (termici, solari, di utenza ed ambientali) hanno sui carichi e sui fabbisogni estivi di energia⁴. Infine l'unico indicatore di prestazione energetica introdotto da dette normative è riferito alla climatizzazione invernale (EP_i), ciò appare in contrasto con la direttiva 2002/91/CE la quale comprende la totalità dei consumi energetici dell'edificio: riscaldamento invernale, condizionamento estivo, produzione di acqua calda sanitaria, illuminazione, ventilazione.

Alcuni tra i software che quantificano le prestazioni energetiche di un edificio hanno un ampio consenso fra gli addetti per effetto della loro immediatezza d'uso anche se, per contro, forniscono un risultato semplificato. Le simulazioni effettuate in regime stazionario consentono di indagare solo parzialmente le reali prestazioni di un edificio perché partono dall'assunto che la variazione periodica delle temperature e il contributo della radiazione solare possono essere trascurati, per cui è possibile utilizzare dati climatici molto aggregati. Le simulazioni effettuate in regime dinamico, invece, permettono un'analisi molto più realistica e completa, valutando nel dettaglio la risposta dell'involucro edilizio sollecitato da vari fattori esterni quali: la temperatura esterna, la radiazione solare, la ventilazione naturale, il comportamento degli occupanti, l'impianto di climatizzazione.

A livello professionale è dunque importantissimo approfondire quanto più possibile le analisi energetiche, dotandosi dei mezzi e delle competenze per utilizzare gli strumenti che operano in regime dinamico, gli unici che possono dare un'informazione completa, tangibile sostegno alla progettazione.

⁴ Molti sono gli esperti che lamentano questa lacuna nell'attuale normativa italiana. Tra questi citiamo il lavoro pubblicato da RockWool Italia di Vincenzo Corrado e Matteo Serraino del dipartimento di energetica dell'università di Torino: *"Il nuovo quadro legislativo italiano sull'efficienza energetica degli edifici D.Lgs 192/2005 + D.Lgs. 311/2006"*, accessibile all'indirizzo www.rockwool.it

2 I SOFTWARE DI SIMULAZIONE

Una simulazione di un edificio è una rappresentazione matematica del comportamento fisico di ogni suo comportamento. Tuttavia, essa non può replicare precisamente una costruzione reale in quanto tutte le simulazioni sono basate su una serie di ipotesi fondamentali che ne pregiudicano l'accuratezza.

Ammesso che la simulazione abbia una rappresentazione teoricamente perfetta del funzionamento di un edificio, essa non può replicare perfettamente le reali dinamiche che regolano il comportamento energetico. Ad esempio, il clima può variare rispetto ai dati meteorologici disponibili; gli impianti non lavorano mai precisamente come previsto dalle curve di funzionamento a carico parziale; le prestazioni possono anche variare con l'età dell'impianto e con il numero effettivo di ore lavorate dall'ultima opera di pulizia o manutenzione.

Conseguentemente, bisogna porre particolare attenzione nell'interpretazione dei risultati, in quanto costituiscono una rappresentazione relativa di come funziona, o può funzionare, un sistema edificio-impianto. Tuttavia, un software di simulazione degli edifici è una risorsa preziosa se interpretata ed usata propriamente. Ad esempio, il confronto fatto sotto le stesse ipotesi fondamentali, tra due o più soluzioni impiantistiche o architettoniche, risulterà molto significativo, oppure, per un edificio esistente, la simulazione può essere finalizzata all'abbattimento delle spese energetiche od anche per replicare fedelmente il consumo energetico in un determinato periodo.

Una comprensione generale ma chiara delle metodologie, e dei loro limiti, usate in un programma di simulazione è essenziale se si vuol applicare soddisfacentemente tale strumento. L'incomprensione di questi aspetti può portare ad una sovra- o sottostima dei dati in ingresso, oppure a dei risultati chiaramente irreali. Inoltre, l'utente è consigliato a familiarizzare con le procedure usate nel software, specie nella fase di inserimento dei dati, soprattutto se si deve eseguire una simulazione complessa o sofisticata.

A tal fine questo elaborato cercherà di fornire una panoramica sulle tecniche di modellazione dei principali fenomeni fisici e non che animano il comportamento del sistema edificio impianto per poi focalizzare l'attenzione sulla validazione di queste procedure.

2.1 Classificazione

I software di simulazione energetica esistono da prima della crisi petrolifera del 1973 tuttavia, solo in seguito a tale episodio, sia nel settore pubblico che in quello privato se ne è incentivato lo studio e lo sviluppo⁵.

I primi programmi (o software) nascono dall'implementazione di procedure di tipo manualistico caratterizzate da uno schema semplificato operante in regime stazionario, forniscono pertanto dei risultati solamente indicativi. Successivamente si sono introdotti dei modelli che tengono conto parzialmente delle dinamiche energetiche che hanno luogo negli edifici. Questi applicativi si

⁵ In [15] è disponibile uno schema rappresentativo dell'intreccio evolutivo di tali strumenti a partire dal 1967 fino alla fine degli anni 70 – primi anni 80.

presentano difficili da utilizzare, anche a causa della mancanza di un'interfaccia grafica, e di impiego limitato poiché sono finalizzati alla risoluzione di problematiche specifiche come il dimensionamento dei canali d'aria oppure la determinazione dei carichi termici.

Nell'attuale generazione, viene simulato il comportamento dell'intero complesso edificio-impianto accoppiando procedure, sia analitiche che numeriche, specifiche per la risoluzione dei vari quesiti; in particolare vengono risolti simultaneamente le modellazioni dei flussi termici, elettrici, luminosi, acustici e del comportamento degli occupanti. Questi software, sebbene presentino un'interfaccia grafica più facile ed intuitiva e siano state introdotte diverse funzioni per aiutare il processo di inserimento dei dati, richiedono un'esperienza non trascurabile da parte dell'utilizzatore.

Al momento gli sforzi che si stanno compiendo in questo settore comprendono certamente lo studio e la formulazione di tecniche di modellazione più precise ed efficienti in termini computazionali, ma anche lo sviluppo di software più completi - ad esempio con una totale integrazione di strumenti per rappresentare la forma e le caratteristiche dell'edificio (*Computer Aided Building Design*) - ed in grado di risolvere un più vasta gamma di situazioni sfruttando tecniche risolutive differenti; in quest'ottica va osservato il lavoro di scrittura del codice sorgente di EnergyPlus dove si è posta una particolare enfasi per quanto riguarda la modularità.

Il processo di sviluppo appena presentato è quello più largamente accettato e riproposto in letteratura; la tabella seguente ne vuole riassumere le peculiarità [5].


Prima generazione	<ul style="list-style-type: none"> – Approccio da manuale – Semplificato – Utilizzo limitato a specifici campi 	<ul style="list-style-type: none"> – Risultati indicativi – Applicazioni limitate – Difficoltà d'uso
Seconda generazione	<ul style="list-style-type: none"> – Dinamica più importante – Meno semplificato – Ancora di utilizzo limitato 	
Terza generazione (attuale)	<ul style="list-style-type: none"> – Soluzione a seconda del tipo di problema (generalità d'impiego di un unico software) – Utilizzo di metodi numerici – Visione integrata dei sottosistemi energetici – Vengono considerati i flussi termici e massici – Interfaccia con l'utilizzatore migliorata – Integrazione parziale delle funzioni CABD 	
Generazione futura	<ul style="list-style-type: none"> – Totale integrazione delle funzioni CABD – Metodi numerici avanzati – Basato su una conoscenza intelligente (autoapprendimento) – Software ingegneristici avanzati 	<ul style="list-style-type: none"> – Predittivo – Generalizzato – Facile da usare

Tabella 1 - Evoluzione dei software (Fonte: Clarke, 2001)

Si vuol sottolineare che alla 1^a e alla 2^a generazione corrispondono i cosiddetti *metodi semplificati* in quanto le formulazioni matematiche implementate sono molto scarse e caratterizzate da molte ipotesi semplificative di fondo (es. regime stazionario), ai software di 3^a e 4^a generazione si associa solitamente il nome di *simulazioni* o *metodi dinamici*.

Un ulteriore criterio di classificazione che compare più volte in letteratura divide i programmi di simulazione in *modulari* (*Modular Simulation Environment*) e *tradizionali*. Al fine di chiarire il

concetto di software modulare si riportano due condizioni che devono essere osservate per rientrare in questa categoria:

- I modelli sono interscambiabili. Il punto centrale di un MSE è che l'architettura del software permette l'uso di modelli altamente differenti e interscambiabili per rappresentare lo stesso fenomeno fisico.
- Gli algoritmi usati per la modellazione sono separati da quelli impiegati per la risoluzione. L'ambiente applicativo consente lo scambio tra diverse procedure risolutive. Al momento solamente in qualche MSE è possibile l'interscambio tra i risolutori implementati tuttavia, sotto questo aspetto, appaiono molto flessibili.

2.2 Cenni sulla complessità dei fenomeni da analizzare

Il cuore del successo dei software di simulazione è l'approccio integrato usato nella modellazione, atto a preservare l'integrità dell'intero sistema edificio-impianto, analizzando simultaneamente tutti i flussi energetici con un livello di dettagli adeguato agli obiettivi del problema ed alla quantità dei dati in possesso. A tal riguardo, un edificio deve essere visto come sistemico (la totalità del sistema è formato da molte parti distinte), dinamico (le parti evolvono con velocità differenti), non lineare (i parametri dipendono dallo stato termodinamico) e, in primis, complesso (esistono una miriade di interconnessioni e iterazioni tra le parti).

Come illustrato in Figura 2, l'ambiente interno degli edifici è determinato da diverse fonti energetiche che evolvono con velocità e metodi differenti. Le sorgenti principali possono essere identificate come:

- *clima esterno*, le cui variabili principali (nel presente contesto) sono: temperatura dell'aria, temperatura radiante, umidità, radiazione solare, velocità e direzione del vento;
- *occupanti*, che provocano un apporto energetico imprevedibile a causa del loro metabolismo, dell'utilizzo di apparecchiature elettriche e dell'aggiustamento delle impostazioni di regolazione;
- *sistemi ausiliari*, che possono provvedere al riscaldamento, al condizionamento oppure alla ventilazione dell'ambiente interno.

Per comprendere la complessità degli scambi energetici che avvengono negli edifici, nel seguito presenteremo, seppur in maniera molto concisa, le loro caratteristiche principali concentrando in particolare sui vari parametri che devono essere considerati per consentirne una corretta rappresentazione a computer.

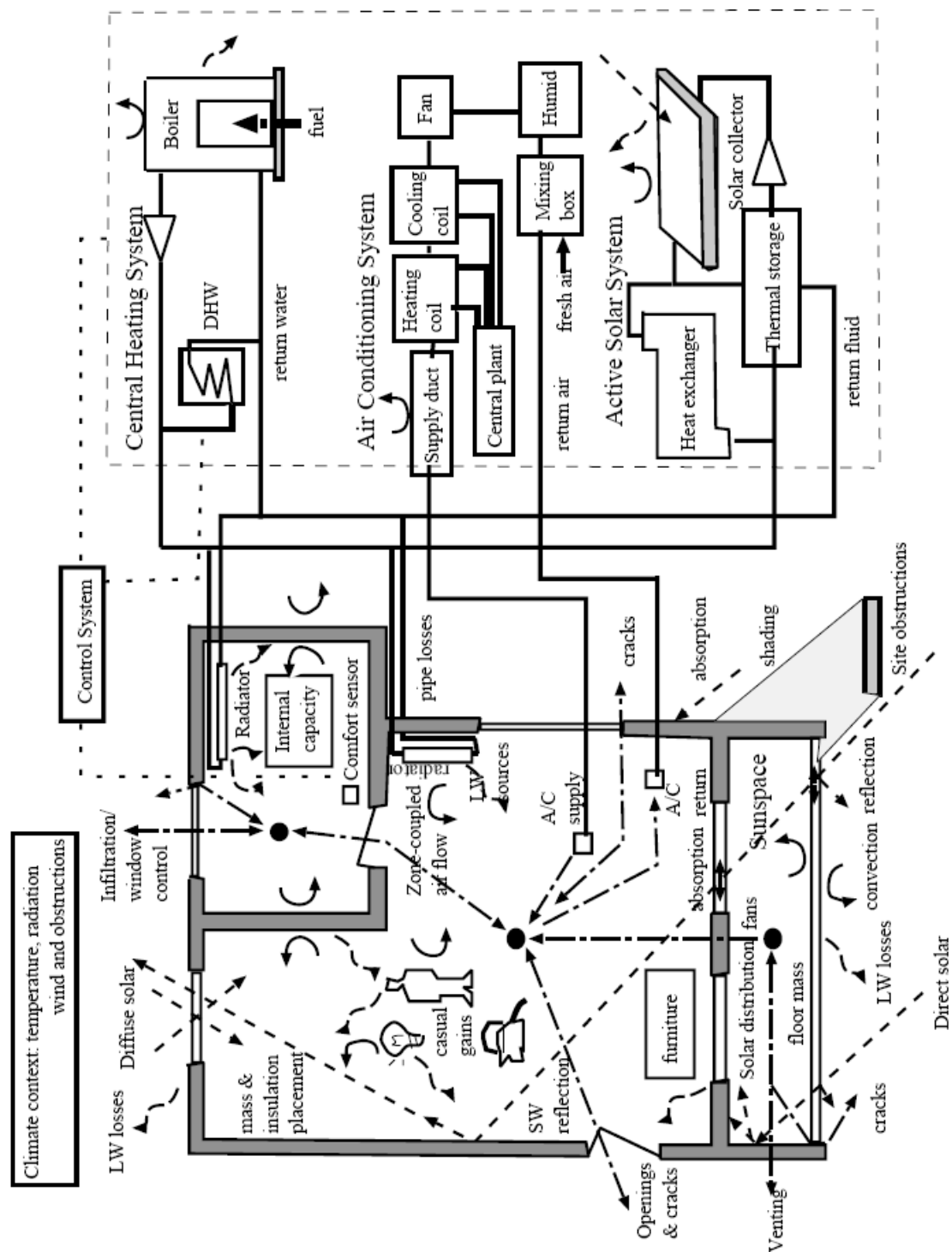


Figura 2 - Flussi energetici in un edificio (Fonte: Hand J W, 1998)

2.2.1 Conduzione termica in regime transitorio

Col termine conduzione termica si identifica il processo col quale una fluttuazione del flusso di calore all'estremità di un materiale si propaga verso l'altra estremità, essendo smorzata in intensità e sfasata nel tempo a causa dell'inerzia termica del materiale. Specificatamente alle strutture edilizie, la conduzione in regime variabile è ovviamente funzione del tempo e dipende dal gradiente termico della temperatura e dall'umidità, parametri a loro volta condizionati dalle proprietà termofisiche dei singoli materiali e dalla loro posizione relativa. L'obiettivo dei modelli è quello di valutare la diffusione dell'umidità e il gradiente della temperatura nei materiali costruttivi e quindi la variazione dinamica del flusso di calore delle superfici esposte alle condizioni ambientali esterne.

Le proprietà termodinamiche di interesse includono la conduttività λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], la densità ρ [kg m^{-3}], e il calore specifico c [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]. Queste proprietà sono dipendenti dal tempo a causa della temperatura dei materiali e della fluttuazione del grado di umidità, inoltre possono essere condizionate dalla posizione o dalla direzione nel caso di materiali non omogenei o anisotropi rispettivamente, tuttavia in qualche applicazione, queste dipendenze possono essere ignorate mantenendole costanti.

Sudette proprietà possono essere combinate per fornire un indice da usare nella progettazione classica, per catalogare delle differenti prestazioni energetiche dei materiali. La trasmittanza termica globale U [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] è data da:

$$\frac{1}{U} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\lambda_i} + \frac{1}{H_{si}} + \frac{1}{H_{se}} + \frac{1}{H_c}$$

dove N è il numero dei diversi strati che formano il materiale da costruzione, x_i è lo spessore dello strato i -esimo [m], H è il coefficiente di adduzione [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] ed i pedici si , se , c indicano la superficie interna, la superficie esterna e la cavità rispettivamente.

Tradizionalmente, i progettisti fanno riferimento a questo semplice coefficiente, calcolato in regime stazionario, per valutare le dispersioni termiche di un edificio. In questo modo oltre ad ignorare del tutto gli aspetti dinamici, si trascura completamente la posizione relativa tra i vari materiali che compongono l'involucro edilizio.

Ad esempio, se l'isolamento è localizzato nella posizione più interna della parete allora ogni radiazione solare a bassa lunghezza d'onda che entra dalle finestre e colpisce la superficie interna, non può essere assorbita velocemente dalla parete poiché l'isolante funge da barriera. Inoltre, l'energia solare causerà un aumento della temperatura superficiale che, conseguentemente, farà crescere la quantità di energia rilasciata all'aria tramite il processo di convezione naturale con un conseguente sovra riscaldamento, fenomeno che colpisce principalmente gli ambienti ad elevata penetrazione di energia solare. Viceversa, se lo strato isolante è posto esternamente, soluzione comunemente chiamata "a cappotto", i carichi interni a bassa lunghezza d'onda possono essere accumulati dalla capacità termica della struttura e quindi smaltiti anche con tecniche passive. D'altro canto, un'elevata capacità termica comporta il rischio di aumentare la richiesta energetica di picco da parte degli impianti, soprattutto nei casi in cui si adotta uno schema di regolazione intermittente o comunque in fase di avviamento, questo pericolo viene a scemare nel caso in cui si

utilizzi una regolazione modulante che è intrinsecamente predisposta per un funzionamento a pieno carico dell'impianto con conseguenti vantaggi prestazionali. Il rischio di condensazione interstiziale è maggiore nel caso di isolamento posto internamente in quanto una porzione della parete potrebbe scendere sotto la temperatura di condensazione dell'aria umida che si diffonde attraverso la parete in assenza di un'efficace barriera al vapore.

Riassumendo la conduzione termica ha effetto sulla domanda energetica, sui picchi di richiesta, sul livellamento dei carichi, sul rendimento con cui opera l'impianto e la potenziale condensazione dell'umidità con conseguente formazione di muffe.

Sfortunatamente non esiste un criterio che possa essere usato dai progettisti per selezionare la soluzione ottimale in ogni circostanza, tuttavia i modelli di simulazione dinamica risultano essere un valido strumento per sopperire a questa carenza cercando di prevedere quali siano le prestazioni termodinamiche dell'edificio.

2.2.2 Irraggiamento interno ad elevata lunghezza d'onda

Lo scambio radiativo, ad elevata lunghezza d'onda, tra le superfici è funzione della temperatura (in maniera non lineare), dell'emissività, dell'estensione e del tipo di contatto visuale che sussiste tra le superfici (fattore di forma), e dalla natura della riflessione superficiale (diffusa, speculare o mista). Naturalmente il flusso energetico tenderà a ristabilire l'equilibrio tra le temperature superficiali raffreddando le superfici calde e riscaldando quelle più fredde. Questo interscambio energetico tra le superfici è importante soprattutto in quei casi dove esiste una forte asimmetria tra le temperature, così come avviene negli ambienti con ampie superfici vetrate ma anche i quelli dotati di impianti a pannelli radianti.

2.2.3 Irraggiamento esterno ad elevata lunghezza d'onda

Lo scambio radiativo, ad elevata lunghezza d'onda, tra le superfici esterne (opache e trasparenti) e la volta celeste oppure con gli edifici circostanti e il terreno può comportare un considerevole abbassamento della temperatura superficiale, specialmente nelle notti serene.

Il trattamento adeguato di questo flusso energetico richiede l'abilità di stima di molti fattori tra cui: la temperatura effettiva del cielo come funzione del tipo di copertura nuvolosa prevalente; la temperatura delle costruzioni circostanti; la temperatura del terreno in funzione delle sue condizioni (umidità, composizione, copertura superficiale); la temperatura locale dell'aria; il riscaldamento superficiale causato da ogni radiazione, a bassa lunghezza d'onda, incidente; e dai fattori di forma che forniscono le informazioni geometriche dell'accoppiamento tra gli elementi sopracitati.

2.2.4 Irraggiamento a bassa lunghezza d'onda

In molti edifici l'apporto energetico solare costituisce una porzione significativa della totalità dei carichi a cui deve sopperire l'impianto di condizionamento, ciò evidenzia l'importanza che si deve prestare nella modellazione della radiazione solare, in quanto incide sull'accuratezza delle prestazioni globali sia dell'edificio che dell'impianto.

Nel caso di chiusure completamente trasparenti, la radiazione solare a bassa lunghezza d'onda che cozza sulla superficie più esterna viene parzialmente riflessa e in parte trasmessa verso l'interno (il vetro risulta trasparente per la radiazione a bassa lunghezza d'onda mentre appare opaco per quelle

a più elevata lunghezza d'onda). Nell'attraversamento degli strati di vetro e dell'intercapedine l'onda radiativa viene in parte assorbita, causando un innalzamento della temperatura, mentre la porzione rimanente prosegue il suo percorso verso il materiale successivo dove si manifestano gli stessi fenomeni.

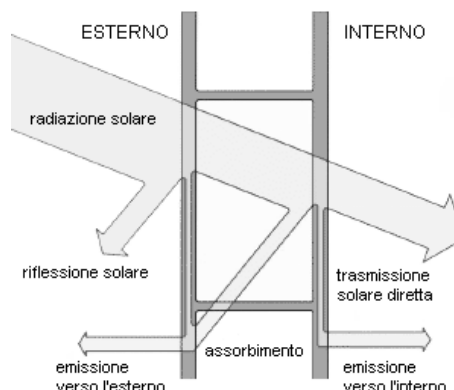


Figura 3 - Propagazione della radiazione solare su superfici vetrate

A questo incremento di temperatura consegue un processo di conduzione più solerte e la formazione di moti convettivi più importanti, infine la stessa temperatura superficiale influenza l'emissione radiativa ad alte lunghezze d'onda.

La componente del fascio incidente che viene direttamente trasmessa colpirà, con uno sfasamento temporale impercettibile, alcune delle superfici interne dove si comporta alla stregua della radiazione che colpisce le superfici esterne: nel caso di superfici opache si ha assorbimento e riflessione mentre, nel caso di superfici trasparenti si ha assorbimento, riflessione e trasmissione.

Una modellazione accurata della radiazione solare richiede metodi di calcolo per la previsione della posizione relativa tra le superfici e il fascio solare. Le proprietà termofisiche interessate includono i coefficienti di assorbimento, riflessione, emissione degli elementi i quali dipendono dall'angolo di incidenza e dalla lunghezza d'onda del raggio incidente. Il modello inoltre è funzione dalla latitudine e longitudine del sito, ora del giorno, mese / anno, e della geometria della superficie.

2.2.5 Ombreggiature

Questo fattore controlla l'intensità e il punto di applicazione dell'energia solare gravando profondamente sull'accuratezza dell'intero algoritmo di simulazione solare. Si richiedono tecniche proiettive e di previsione temporale per la stima delle aree ombreggiate, le quali necessitano dell'esatta conoscenza della configurazione geometrica sia degli elementi costruttivi che della dislocazione dell'arredamento interno.

Usualmente si assume che l'ombreggiatura riduca l'intensità della radiazione diretta mentre quella diffusa rimane inalterata fintanto che l'effettivo angolo solido, a cui afferisce la superficie in questione, viene drasticamente ridotto.

Si possono individuare tre fonti principali di ombreggiatura:

- ombreggiatura propria dovuta alla proiezione dell'ombra di alcuni elementi dell'edificio su altre porzioni dell'involucro;
- ombreggiatura generata da ostacoli vicini come schermi fissi (aggetti orizzontali o verticali) o schermi mobili (veneziane, tende, ecc.);
- ombreggiatura generata da ostruzioni dell'ambiente circostante all'edificio, quali possono essere costruzioni, vegetazione alta, oppure rilievi orografici.

I sistemi di ombreggiamento artificiale comportano la modifica del campo di moto convettivo dell'aria nei dintorni delle aperture trasparenti. In particolare, nel caso di tapparelle poste all'esterno, il moto convettivo viene spesso considerato solo in funzione degli agenti ambientali quali la velocità e la direzione del vento, mentre, nel caso di veneziane posizionate all'interno, la distanza dal vetro, la finitura superficiale delle lamelle e la loro inclinazione sono solo alcuni dei parametri che devono essere considerati.

2.2.6 Flussi d'aria

Negli edifici, tre sono i predominanti flussi d'aria che provocano un incremento dello scambio termico per avvezione: infiltrazioni, flussi con gli ambienti confinanti e ventilazione forzata.

Al termine infiltrazione si associano tutti gli ingressi d'aria provenienti dall'esterno, questi possono essere suddivisi in due categorie: infiltrazioni d'aria incontrollabili sia attraverso le tenute dei serramenti che tramite l'involucro edilizio stesso, ingressi d'aria desiderati attuati con l'apertura di porte e finestre. A questo secondo gruppo viene spesso associato il nome di ventilazione naturale che si contrappone alla ventilazione forzata solo nel modo adottato per effettuare il ricambio d'aria, effettuato tramite apparecchiature meccaniche nel caso di ventilazione forzata.

Avvenimenti casuali, come l'apertura di porte e finestre, e l'utilizzo intermittente degli impianti di ventilazione incidono fortemente sulla valutazione dei flussi d'aria in quanto influenzano non solo gli spazi direttamente interessati ma anche gli ambienti adiacenti. A scopo indicativo riportiamo in Figura 4 i principali fattori che influenzano la distribuzione dei flussi d'aria.

Il movimento dell'aria è spesso rappresentato con una maglia dove i nodi rappresentano dei volumi fluidi, caratterizzati da parametri termodinamici quali la temperatura, la pressione, l'umidità, mentre le connessioni nodali rappresentano i percorsi, comprensivi delle perdite, che connettono questi volumi e attraverso i quali l'aria può fluire. Per determinare i parametri di ogni nodo della rete vengono solitamente impiegate tecniche di calcolo numerico. Nei casi di fine discretizzazione si coinvolge la soluzione delle equazioni di Navier-Stokes congiuntamente alle equazioni di continuità di massa e del bilancio energetico.

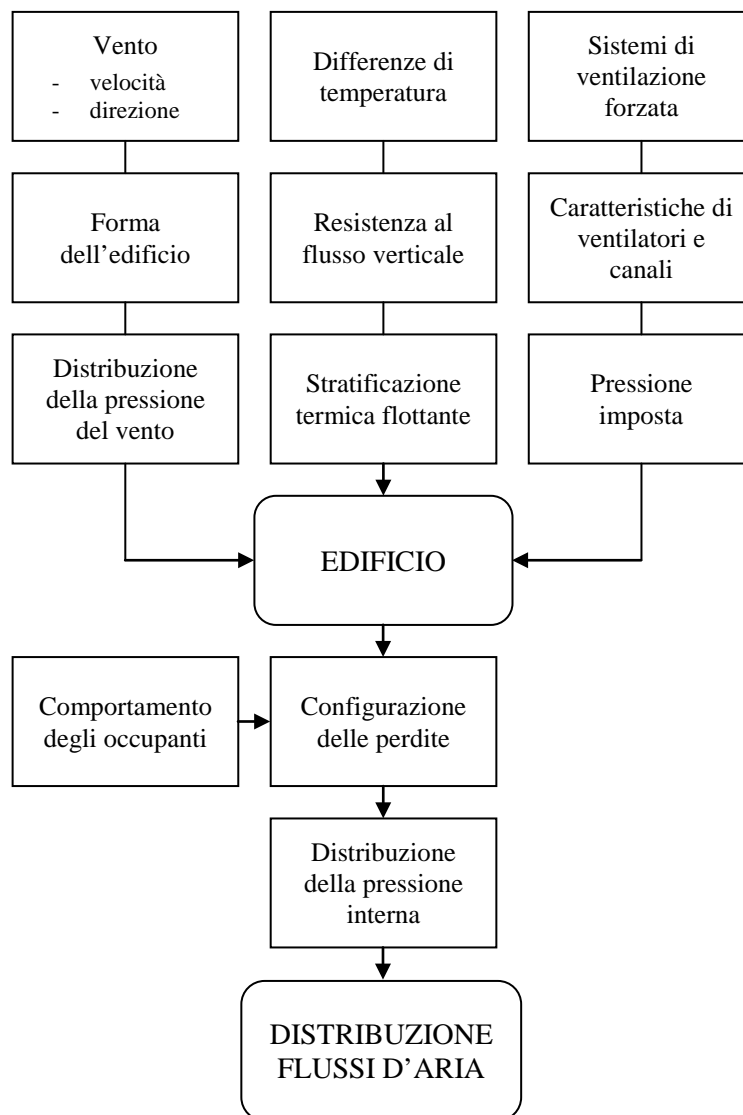


Figura 4 - Fattori che influenzano la distribuzione dei flussi d'aria negli edifici
(Fonte: Tuomaala, 2002)

2.2.7 Guadagni gratuiti

Principalmente negli edifici non residenziali, gli effetti dei carichi termici e luminosi delle apparecchiature elettroniche, degli occupanti e di altri sistemi energetici possono essere considerevoli. Risulta pertanto importante simulare il loro comportamento nel modo più realistico possibile, tenendo conto anche del loro reale utilizzo nei vari momenti lavorativi della giornata.

Tipicamente, gli apporti termici (convettivi e radiativi) vengono processati separatamente dalle emissioni di umidità per permetterne la modulazione in funzione di prescrizioni sul comportamento degli occupanti, oppure seguendo quelle dettate dai sensori nei locali. Normalmente si considera che la cessione di calore per convezione avvenga istantaneamente, come se fosse un carico termico direttamente fornito all'aria, al contrario il calore scambiato per irraggiamento viene simulato alla stregua delle radiazioni a bassa lunghezza d'onda che penetrano nell'edificio; si andrà quindi ad analizzare, a seconda dei materiali e della loro dislocazione, la porzione di onde riflesse e assorbite. A causa dell'inerzia termica, sia dell'arredamento che dell'involucro, l'irraggiamento assorbito dai

materiali viene poi rilasciato, sotto forma di calore, con uno sfasamento temporale dipendente dalla capacità termica di ognuno.

Alcuni apporti termici casuali, come gli apparecchi elettronici e luminosi, richiederanno l'elaborazione di un modello del loro comportamento elettrico al fine di modulare l'emissione di calore in funzione del loro reale consumo elettrico.

2.2.8 Impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC systems)

L'intero sistema impiantistico, nei riguardi della modellazione, viene solitamente diviso in due categorie: l'impianto e le macchine.

L'impianto consiste nei componenti atti alla distribuzione del fluido termo vettore (aria e/o acqua) nelle varie zone dell'edificio: canali d'aria, tubazioni, valvole, pompe, ventilatori, serrande, ecc. I modelli per questi componenti sono finalizzati al calcolo dell'energia necessaria per vincere le perdite prima di giungere ai terminali di riscaldamento o condizionamento, dove l'energia residua (pari a quella calcolata nella modellazione dei carichi) viene trasferita all'ambiente da climatizzare.

Nella categoria delle macchine rientrano tutte quelle apparecchiature elettriche e meccaniche usate per la produzione di acqua refrigerata, acqua calda, oppure per il condizionamento dell'aria. I modelli di questi dispositivi relazionano la domanda di energia primaria, come elettricità, gas naturale, olio combustibile, con le richieste dell'impianto (carichi termici + perdite). Le prestazioni dinamiche di questi macchinari, devono essere analizzate a carico parziale, per far ciò vengono introdotte formule di regressione per poter valutare le curve di funzionamento a partire dai pochi dati forniti dai costruttori.

Essenzialmente esistono due approcci per esplicitare la simulazione dei sistemi impiantistici, così come evidenziato in Figura 5.

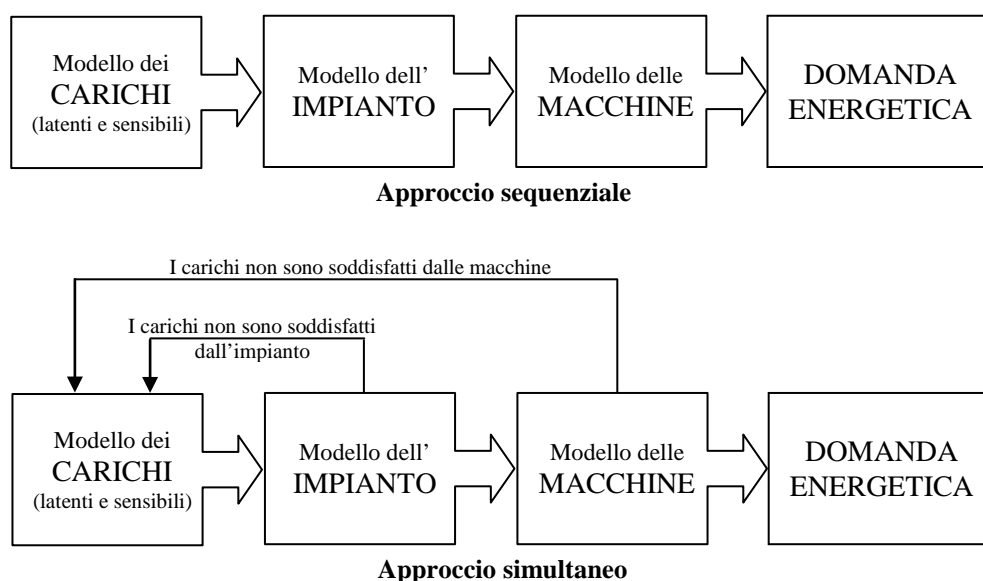


Figura 5 - Approcci risolutivi sequenziale e simultaneo (Fonte: Bush, 1996)

Nell'approccio sequenziale, i componenti dell'impianto sono sostituiti da una correlazione input/output equivalente, in modo che i dati in uscita da un componente costituiscono i dati in ingresso di quello successivo. Un metodo risolutivo iterativo viene impiegato su tutta la rete fino alla convergenza. Gli algoritmi che rappresentano i componenti possono essere semplificati (ad esempio interpolando, con opportune formule di regressione, i dati forniti dai costruttori), oppure dettagliati (ad esempio applicando le relazioni matematiche fondamentali della termodinamica). Questa tecnica presenta tre vantaggi principali: (a) differenti metodi di modellazione possono essere applicati ai componenti, permettendo così la coesistenza di metodi dettagliati e di metodi semplificati ove possibile; (b) viene favorita una rapida codifica di modelli "prototipo" in quanto possono essere inizialmente rudimentali; (c) la discretezza dell'approccio previene un impatto negativo, dei nuovi modelli, sulla soluzione globale. Le lacune di questo metodo emergono quando viene incluso un controllo dinamico, oppure quando i dati in ingresso di un modello dipendono dagli stessi dati in uscita.

Nell'approccio simultaneo, ogni componente impiantistico è rappresentato da un numero discreto di volumi finiti, ognuno dei quali è caratterizzato da una serie di equazioni di conservazione (energia, massa, energia cinetica, ecc.). L'equazione matriciale che emerge per la rete dei componenti può essere combinata con quella che descrive i flussi energetici nell'edificio, in questo modo possono essere risolte simultaneamente adottando appropriate tecniche numeriche.

Per ridurre la complessità dell'intera rete dell'impianto, è possibile limitare il numero dei volumi finiti, in genere a 1 o 2, e quindi utilizzare un algoritmo indipendente per rappresentare i processi interni del componente. L'equazione matriciale della rete rappresenta, con riferimento all'analogo circuito elettrico, il collegamento con resistenze e capacità tra i vari volumi finiti, ovvero con gli algoritmi usati per descrivere il comportamento dei vari componenti.

Ad ogni modo, sia nel caso di bassa o alta discretizzazione, i problemi connessi all'approccio sequenziale sono ormai superati.

2.2.9 Controllo

Al fine di creare un software di simulazione che segua un percorso più veritiero possibile, si deve introdurre un modello di simulazione degli organi di regolazione dell'impianto. A differenza delle schematizzazioni viste finora, questo comporta la creazione di molti cicli chiusi, ognuno dei quali comprende un sensore (per misurare uno o più parametri simulati), un attuatore (che riceve il segnale di controllo e conseguentemente agisce sull'organo regolato) e una legge di regolazione (che relaziona il valore misurato con l'azione espressa dall'attuatore).

I modelli usati nei software di analisi energetica invece, oltre a riprodurre le normali funzioni di regolazione, programmazione, ottimizzazione, limitazione e sicurezza a cui sono adibiti questi automatismi, vengono usati anche per trasferire informazioni da un modello all'altro; ad esempio si può aggiornare un coefficiente di trasmissione termica oppure si impone l'esecuzione un modello più dettagliato.

2.3 Generalità sulla modellazione

Un modello matematico è la descrizione del comportamento di un sistema, ed è formato tra tre componenti principali:

1. *variabili in ingresso*, che animano il sistema, queste possono essere di due tipi: controllabili e non controllabili (es. clima).
2. *struttura del sistema e suoi parametri/proprietà*, che provvedono alla necessaria descrizione fisica del sistema (es. massa termica o proprietà degli elementi).
3. *dati in uscita* che descrivono la reazione del sistema quand'è sollecitato dalle variabili in ingresso. Possono essere variabili di risposta (es. fabbisogno energetico) o dipendenti (es. temperatura interna).

Esistono due strade, con distinti criteri di modellazione, il cui uso è dettato dall'obiettivo dell'analisi. Il metodo classico coinvolge la determinazione della terza componente di un sistema quando le altre due sono note, l'approccio inverso (*Data-Driven Approach*) invece si propone di determinare la struttura e le proprietà del sistema.

2.3.1 Metodo diretto

L'obiettivo è quello di predire le variabili di output di un modello specificato con struttura e parametri noti quando è soggetto a dei dati in ingresso specificati. Per assicurarne l'accuratezza, i modelli tendono a diventare altamente complessi, specialmente con l'avvento di calcolatori più potenti ed economici.

Questo approccio presume la conoscenza dettagliata non solo dei vari fenomeni naturali che incidono sul comportamento del sistema, ma anche dell'intensità delle varie iterazioni. Il principale vantaggio di questo metodo è che il sistema edificio-impianto non necessita di essere fisicamente esistente al fine di predirne il suo comportamento, pertanto questo criterio è ideale nella fase progettuale preliminare o nello stadio di analisi e risulta quindi il metodo più usato.

La modellazione diretta dei consumi energetici di un edificio inizia con la descrizione fisica della struttura edilizia o di una sua porzione di interesse. Ad esempio, geometria dell'edificio, localizzazione geografica, caratteristiche fisiche (es. materiali e spessori delle pareti), tipologia di impianto di climatizzazione, programmazione e regolazione dell'impianto, destinazione d'uso degli ambienti, ecc. vengono specificati in questa fase. Il consumo energetico di picco e medio, oppure il grado di comfort nelle varie zone, può essere previsto o simulato tramite l'approccio diretto. La Figura 6 mostra la configurazione tipica di questi programmi, i quali talvolta sono corredati da un'analisi economica del progetto esaminato.

Il beneficio principale di questa procedura è che, essendo basato su principi fisici insegnati nelle università, viene accettato largamente dagli operatori.

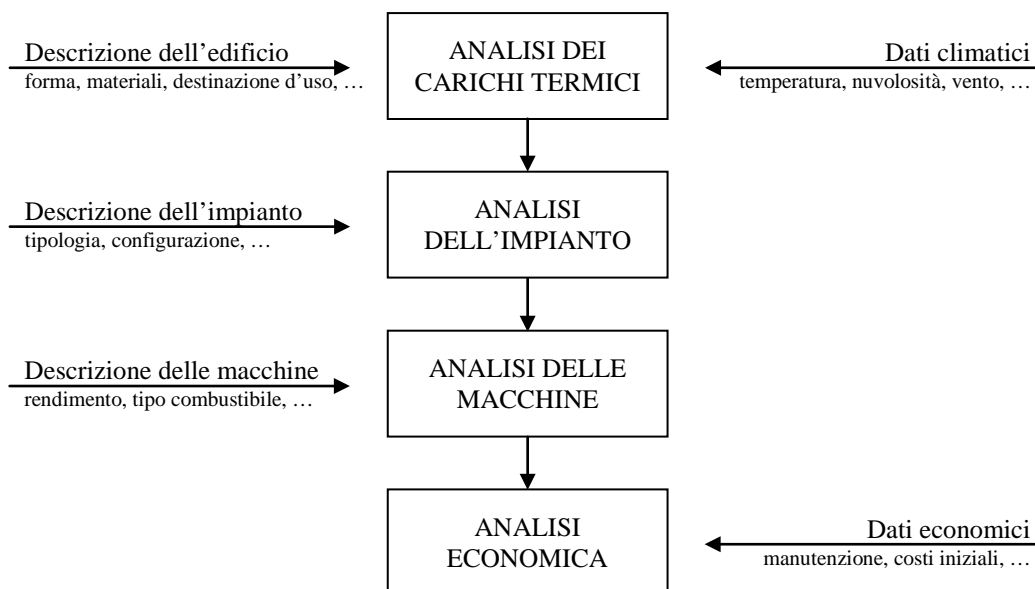


Figura 6 - Struttura di un software di simulazione energetica degli edifici (Fonte: ASHRAE, 2005)

2.3.2 Metodo inverso

L'obiettivo è quello di definire un modello che rappresenti accuratamente un edificio realmente esistente, consentendo così la previsione più accurata del comportamento futuro in determinate circostanze specifiche.

Il metodo inverso, diversamente dal metodo diretto, può contenere solo un numero relativamente piccolo di parametri a causa delle limitate informazioni e spesso ripetitive contenute nei dati prestazionali. È quindi un modello molto più semplice che contiene meno termini per rappresentare dei parametri aggregati o macroscopici (es. le costanti, la perdita di calore complessiva dell'edificio e il tempo) rilevati direttamente in loco. La raccolta dei dati prestazionali e la formulazione del modello devono essere opportunamente calibrati per ogni specifica circostanza, spesso si richiede un più alto livello di abilità e competenze dell'utente.

In generale, “modelli inversi” sono meno flessibili rispetto ai modelli classici nella valutazione di differenti alternative architettoniche e/o impiantistiche, e quindi non sono un sostituto a questo proposito. L'approccio diretto può comunque essere usato per valutare le prestazioni future di edifici già esistenti, ripetendo l'analisi fatta nella fase di progettazione. La calibrazione consiste proprio nel mettere a punto un modello di simulazione classico, tuttavia questo processo si rivela scomodo e faticoso.

2.3.2.1 Approccio empirico o “Black-Box”

Con questo criterio, si identifica un modello di regressione semplice o multipla tra il consumo energetico misurato e i vari parametri che lo influenzano (es. dati climatici, occupazione dell'edificio). La forma dei modelli di regressione può essere puramente statistica o basata su fondamentali formulazioni ingegneristiche, ad ogni modo non è possibile assegnare un vero e proprio significato fisico ai coefficienti identificati dal modello. Questo criterio può essere usato con qualunque scala di tempo (mensile, giornaliera, oraria o inferiore) se i dati necessari sono disponibili.

L'identificazione del modello è relativamente semplice, di solito richiede poco sforzo, e può essere utilizzata in varie circostanze diverse, per questo motivo l'approccio empirico è il più usato tra i metodi inversi (cfr. Tabella 2). È possibile utilizzare tecniche più sofisticate di regressione, di cui quella ai minimi quadrati è la più comune. Il criterio puramente statistico è solitamente adeguato per la valutazione di diverse soluzioni per la gestione della domanda energetica dell'edificio, oppure per la modellazione di apparecchiature come pompe, ventilatori, caldaie e chiller nel caso in cui si abbia a disposizione la necessaria quantità di dati prestazionali. Sebbene questo metodo permette l'individuazione dei difetti di macchine ed edifici, sono di scarso utilizzo per l'individuazione delle cause che concorrono a determinare tali fenomeni (con una possibile eccezione per le Artificial Neural Network).

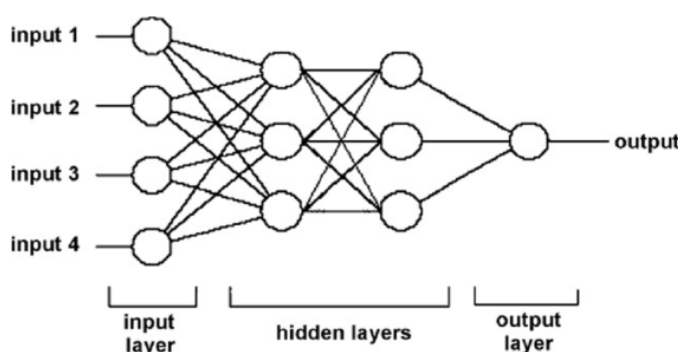


Figura 7 - Schema di rete neurale FeedForward (Fonte: Neto e Fiorelli, 2008)

Le ANN sono considerate intuitive in quanto apprendono attraverso esempi piuttosto che seguire algoritmi predefiniti. L'abilità di "autoapprendimento" delle "regole" che controllano un determinato fenomeno fisico, è uno degli aspetti chiave del loro successo. Una rete neurale consiste in una serie di "fogli" denominati layer dove il primo contiene tutti i dati in ingresso (es. costituiti dai dati storici sul consumo energetico e sulle condizioni climatiche esterne), seguito da altri fogli nascosti attraverso i quali si dirama la rete, e l'ultimo include tutti gli output corrispondenti agli input forniti. La Figura 7, mostra il modello di rete neurale usato in uno studio comparativo tra la tecnologia ANN ed i più diffusi software di simulazione [18], formato da undici neuroni disposti su 4 layer. Da osservare è che i collegamenti tra i neuroni della ANN di figura sono consentiti solo tra quelli di layer successivi, pertanto questa configurazione prende il nome di *feed-forward model*. Esistono anche altri schemi più complessi che consentono collegamenti anche tra i neuroni dello stesso layer come la *SelfOrganizing Map*, nella quale è la rete stessa a cambiare durante il processo di apprendimento. Una sfida con questa tecnologia consiste nel creare una rete sufficientemente complessa da non richiedere eccessivi tempi computazionali.

La strada per eseguire il processo di apprendimento (*network training*) inizia con una modesta quantità di numeri casuali, successivamente il peso dei vari coefficienti viene aggiustato iterativamente con l'ausilio di una serie di coppie di dati input/output cosicché l'applicazione di determinati valori produce i desiderati risultati.

Questi modelli sono stati usati soddisfacentemente nella modellazione dei consumi energetici di edifici commerciali per:

- predire ciò che dovrebbe fare un edificio che funzioni correttamente rispetto al funzionamento attuale. Se esiste qualche diversità, si può usare un sistema più complesso per produrre diagnosi preventive per la risoluzione dei problemi.
- predire quale sarebbe stato il consumo, prima di una miglioria energetica, alle condizioni attuali. Confrontando i due casi si ottiene una buona stima del risparmio energetico ottenuto a seguito della ristrutturazione.

2.3.2.2 Simulazione calibrata

Questo approccio utilizza gli esistenti software di simulazione del sistema edificio-impianto e “mette a punto” o calibra i vari dati in ingresso per il programma affinché il consumo energetico misurato coincida perfettamente con quello previsto dal software. Dopo aver fatto questa procedura, si possono eseguire previsioni molto più attendibili che con approcci statistici. La simulazione calibrata è incentivata nei casi in cui sono disponibili solamente le misurazioni che riguardano l'intero sistema e si vuol procedere con un'analisi comparativa per la stima del risparmio energetico conseguente a ristrutturazioni o altri adattamenti. Molti sono gli studi riportati in letteratura nei quali si utilizzano i classici software di simulazione, come DOE-2 o ESP-r, per calibrarli con i dati di performance. I dati energetici monitorati su scala oraria (più compatibili con il passo temporale adottato nei maggiori software di simulazione) permettono lo sviluppo di modelli calibrati più accurati. Gli analisti solitamente devono lavorare con una minor quantità di dati, talvolta vengono impiegati un aggregato di dati su base mensile oppure settimanale, probabilmente il modello risultante sarà meno preciso al decrescere della quantità dei dati utilizzati per la calibrazione.

Le sfide principali nella simulazione calibrata riguardano l'intenso lavoro richiesto all'utente, sono necessarie infatti competenze e abilità nella gestione pratica degli edifici e conoscenze di simulazione.

Diverse difficoltà pratiche impediscono di raggiungere una simulazione calibrata che rifletta da vicino le prestazioni dell'edificio attuale, tra cui:

- la misurazione e l'adeguamento dei dati meteorologici per l'uso da parte dei software di simulazione (ad esempio, la conversione della radiazione solare orizzontale globale in radiazione diffusa e diretta);
- la scelta dei metodi utilizzati per calibrare il modello;
- la scelta dei metodi utilizzati per misurare i parametri di input necessari per la simulazione (cioè, la massa della costruzione, o coefficienti di infiltrazione, e i coefficienti di ombreggiatura).

Modelli “veramente” calibrati sono stati raggiunti solo in poche applicazioni in quanto richiedono un gran numero di parametri di input, un elevato grado di competenza, ed enormi quantità di tempo di calcolo, pazienza, e risorse finanziarie.

Alcuni studi suggeriscono l'utilizzo di modelli più semplici, in modo da permettere l'esecuzione della calibrazione più velocemente in quanto ci sono meno parametri da modificare. Tipicamente l'edificio viene diviso in due zone: la zona perimetrale e la zona interna. La zona interna si assume che sia perfettamente isolata dalle dispersioni attraverso l'involucro edilizio, mentre gli apporti di calore solare, quelli per conduzione e le infiltrazioni sono considerati come carichi della sola zona esterna. In questo modo, noto l'andamento orario dei carichi interni, la descrizione fisica dell'edificio, la tipologia e la configurazione dell'impianto di climatizzazione e i dati meteo, è possibile quantificare per ogni ora e per diversi giorni all'anno l'energia richiesta all'impianto utilizzando un modello semplificato.

2.3.2.3 Approccio "Grey-Box"

Questo criterio inizialmente formula un modello fisico per rappresentare la configurazione dell'edificio o del sistema impiantistico o dell'intero sistema edificio-impianto, poi individua importanti parametri di rappresentazione di alcuni fenomeni fondamentali, i parametri fisici aggregati e le caratteristiche delle analisi statistiche. A vantaggio di questo criterio si ha che, analogamente al metodo diretto, il sistema da risolvere si basa su un modello ben noto e con significato fisico, mentre la trattazione dei dati è accomunabile all'approccio empirico. Questo richiede un elevato livello di competenze da parte degli utenti, sia nella creazione di appropriate equazioni di modellazione che nella stima di questi parametri. Questo approccio ha un grande potenziale, soprattutto per l'individuazione dei guasti e la diagnosi e il controllo on-line, ma la sua applicabilità all'intera domanda energetica dell'edificio risulta limitata.

2.3.3 Panoramica sui principali metodi d'analisi energetica

La Tabella 2 elenca i principali metodi che vengono usati nell'analisi energetica degli edifici, dividendoli in metodi in regime stazionario, a cui appartengono tutte quelle procedure che vengono usate per una rapida stima del fabbisogno energetico, e metodi dinamici a cui si fa maggiormente riferimento in questo lavoro. Si vuol evidenziare che diversamente dalla nomenclatura usata al capitolo 2.1, dove con *metodi semplificati* si sono indicate delle procedure sempre in regime stazionario ma semplificate, nella terminologia attuale rientrano anche quei criteri più complessi precedentemente esclusi.

La maggior parte dei programmi di simulazione contemporanei sono basati su metodi che adoperano le funzioni di risposta oppure su metodi numerici alle differenze finite o, equivalentemente, ai volumi finiti.

Il primo metodo è appropriato per la soluzione di sistemi di equazioni differenziali caratterizzati da parametri lineari tempo invarianti. I metodi numerici, d'altra parte, possono essere utilizzati per risolvere variabili nel tempo e sistemi di equazioni non-lineari senza aver bisogno di assumere un disaccoppiamento tra le equazioni come comodità di calcolo; tuttavia i metodi alle differenze finite attuano una discretizzazione del dominio di analisi e pertanto, contrariamente ai metodi basati sulle funzioni di risposta, richiedono la definizione della geometria da analizzare.

I metodi numerici sono preferibili per una serie di motivi. In primo luogo, al fine di garantire la precisione, è essenziale preservare l'integrità spaziale e temporale dei sistemi energetici reali, questo si ottiene attraverso la produzione di sistemi di equazioni alle derivate parziali che vengono

risolti simultaneamente ad ogni passo di calcolo. Secondo, a differenza delle funzioni di risposta, sono in grado di gestire le complesse interazioni tra i flussi energetici. Terzo, i parametri tempo-dipendenti evolvono ad ogni passo di integrazione, inoltre la velocità di trattazione può essere adattata per gestire i cosiddetti sistemi rigidi, nei quali le variabili temporali variano significativamente tra le diverse parti del problema (involucro edilizio, componenti impiantistiche, elementi del sistema di controllo, analisi fluidodinamica).

Method	Forward	Data-Driven			Comments
		Empirical or Black-Box	Calibrated Simulation	Physical or Gray-Box	
Steady-State Methods					
Simple linear regression	–	X	–	–	One dependent parameter, one independent parameter. May have slope and y-intercept.
Multiple linear regression	–	X	–	–	One dependent parameter, multiple independent parameters.
Modified degree-day method	X	–	–	–	Based on fixed reference temperature of 18.3°C.
Variable-base degree-day method, or 3-P change point models	X	X	–	X	Variable base reference temperatures.
Change-point models: 4-P, 5-P	–	X	–	X	Uses daily or monthly utility billing data and average period temperatures.
ASHRAE bin method and data-driven bin method	X	X	–	–	Hours in temperature bin times load for that bin.
ASHRAE TC 4.7 modified bin method	X	–	–	–	Modified bin method with cooling load factors.
Multistep parameter identification	–	–	–	X	Uses daily data to determine overall heat loss and ventilation of large buildings.
Dynamic Methods					
Thermal network	X	–	–	X	Uses equivalent thermal parameters (data-driven mode).
Response factors	X	–	–	–	Tabulated or as used in simulation programs.
Fourier analysis	X	–	X	X	Frequency domain analysis convertible to time domain.
ARMA model	–	–	–	X	AutoRegressive Moving Average (ARMA) model.
PSTAR model	X	–	X	X	Combination of ARMA and Fourier series; includes loads in time domain.
Modal analysis	X	–	–	X	Building described by diagonalized differential equation using nodes.
Differential equation	–	–	–	X	Analytical linear differential equation.
Computer simulation (DOE-2, BLAST, EnergyPlus)	X	–	X	–	Hourly and subhourly simulation programs with system models.
Computer emulation (HVACSIM+, TRNSYS)	X	–	–	–	Subhourly simulation programs.
Artificial Neural Networks	–	X	–	–	Connectionist models.

Tabella 2 - Classificazione dei metodi per l'analisi energetica degli edifici (Fonte: ASHRAE 2005)⁶

⁶ Si è preferito riportare la tabella in lingua originale in quanto, per alcuni metodi, non esiste una traduzione univoca che non lasci dubbi all'interpretazione.

3 LA VALIDAZIONE

Le prestazioni crescenti dei calcolatori hanno generato una proliferazione di software di simulazione per l'analisi energetica degli edifici. Tali strumenti utilizzano una serie di approcci diversi per il calcolo del fabbisogno energetico e ci vuole poco affinché un qualsiasi controllo di qualità non riesca a sottolineare le falle di alcune delle procedure di calcolo impiegate.

Uno dei primi studi di valutazione tra i vari strumenti di progettazione, condotto dal *National Renewable Research Laboratory* (NREL, allora denominato *Solar Energy Research Institute*) nei primi anni ottanta, mostrò delle grandi ed inspiegabili differenze tra questi software di previsione anche nel caso in cui le simulazioni venissero eseguite da esperti e con gli stessi dati in ingresso. Lavori più recenti per sviluppare dei test sui software e sulle procedure di validazione mostrano che le cause delle diverse previsioni possono essere isolate, e che i bug che potrebbero causare queste anomalie possono essere individuati e risolti con un conseguente miglioramento del programma.

3.1 Metodologia di validazione

La procedura di validazione sviluppata in quegli anni è oggi, seppur con leggere revisioni ed aggiustamenti, largamente accettata dalla comunità scientifica. La validazione completa di un software si compone di tre differenti tipi di test strettamente interconnessi:

1. **Validazione analitica.** Gli output di un programma, di una subroutine o di un algoritmo vengono confrontati con la soluzione analitica di casi test ideali caratterizzati da condizioni al contorno semplificate.
2. **Validazione empirica.** Gli output di un programma, di una subroutine o di un algoritmo vengono confrontati con i dati monitorati e registrati di una reale costruzione fisica, delle test, o esperimenti di laboratorio.
3. **Validazione comparativa.** Un software viene confrontato con se stesso o con altri applicativi che possono essere considerati maggiormente verificati o più dettagliati e, presumibilmente, più corretti.

Queste tecniche sono mostrate schematicamente in Figura 8, mentre la Tabella 3 ne elenca i principali vantaggi e svantaggi. Pur incorrendo nella possibilità di sembrare ripetitivi, vogliamo sottolineare la differenza tra il termine *modello* e *procedura di risoluzione*. Qui un *modello* è la rappresentazione della realtà per un dato comportamento fisico. Ad esempio, un metodo per modellare il trasferimento di calore attraverso una parete si attua utilizzando ipotesi semplificative come la conduzione monodimensionale. La *procedura di risoluzione* è un termine che comprende la matematica e la sua codifica a computer per risolvere un determinato modello (es. un'approssimazione alle differenze finite per risolvere una equazione differenziale) e la tecnica per l'integrazione dei singoli modelli e le condizioni al contorno in una metodologia risolutiva globale (es. un bilancio energetico iterativo tra i vari strati di una singola parete, tra tutte le superfici di una data zona, o tra più zone ed i sistemi matematici ad esso connesso). Il processo di soluzione per un modello può essere perfetto, mentre il modello rimane difettoso o inadeguato per un determinato scopo o situazione fisica; ad esempio utilizzando un modello monodimensionale di conduzione termica per rappresentare una situazione in cui la conduzione bidimensionale è dominante.

Tecnica	Vantaggi	Svantaggi
Empirica Test del modello e del processo di risoluzione	<ul style="list-style-type: none"> – Approssimazione veritiera della realtà entro i limiti di precisione sperimentale – Qualunque livello di complessità 	<ul style="list-style-type: none"> – Incertezza sperimentale: <ul style="list-style-type: none"> ○ calibrazione degli strumenti, discretizzazione spazio-temporale ○ conoscenza/specificazione imperfetta degli oggetti sperimentali che devono essere simulati – Misurazioni dettagliate e di elevata qualità costose e tempo dispendiose – Solo un numero limitato di test sono funzionali
Analitica Test del processo di risoluzione	<ul style="list-style-type: none"> – Nessuna incertezza sui dati di input – Soluzione matematica esatta per il modello dato – Economica 	<ul style="list-style-type: none"> – Non è possibile verificare la validità di un modello – Limitata a casi altamente vincolati per i quali è possibile ricavarne una soluzione analitica
Comparativa Test di confronto del modello e del processo di risoluzione	<ul style="list-style-type: none"> – Nessuna incertezza sui dati di input – Qualunque livello di complessità – Sono possibili numerosi confronti diagnostici – Economica e rapida – Riesce ad individuare gli ambiti in cui sono necessari ulteriori investigazioni empiriche 	<ul style="list-style-type: none"> – Approssimazione non veritiera della realtà (è consigliabile usare più software che usano modelli differenti per rappresentare lo stesso fenomeno)

Tabella 3 - Tecniche di validazione (Fonte: Neymark, J. e R. Judkoff, 2002)

La validazione empirica è necessaria per stabilire la fedeltà con cui un programma analizza un reale comportamento fisico, tuttavia questa tecnica di validazione è possibile solo all'interno della gamma di incertezza di misura, che include sia l'incertezza degli strumenti che l'incertezza dovuta alla discretizzazione spaziale e temporale. Le celle di prova e gli edifici stessi sono oggetti relativamente grandi e complessi, risulta quindi difficile conoscere l'esatta natura dei dettagli costruttivi, le proprietà dei materiali e la loro effettiva dislocazione e configurazione nel campo. L'operatore è quindi lasciato con un certo grado di incertezza per quanto concerne i dati di input che rappresentano con precisione l'oggetto sperimentale. Nella descrizione degli apparati sperimentali è richiesta una particolare cura e precisione cosicché gli utenti possano ridurre al massimo tale incertezza, questo implica la determinazione sperimentale della maggior quantità di proprietà di più materiali possibili, ciò include anche i parametri generali della struttura come i coefficienti di trasmissione termica in regime stazionario e l'effettiva massa termica.

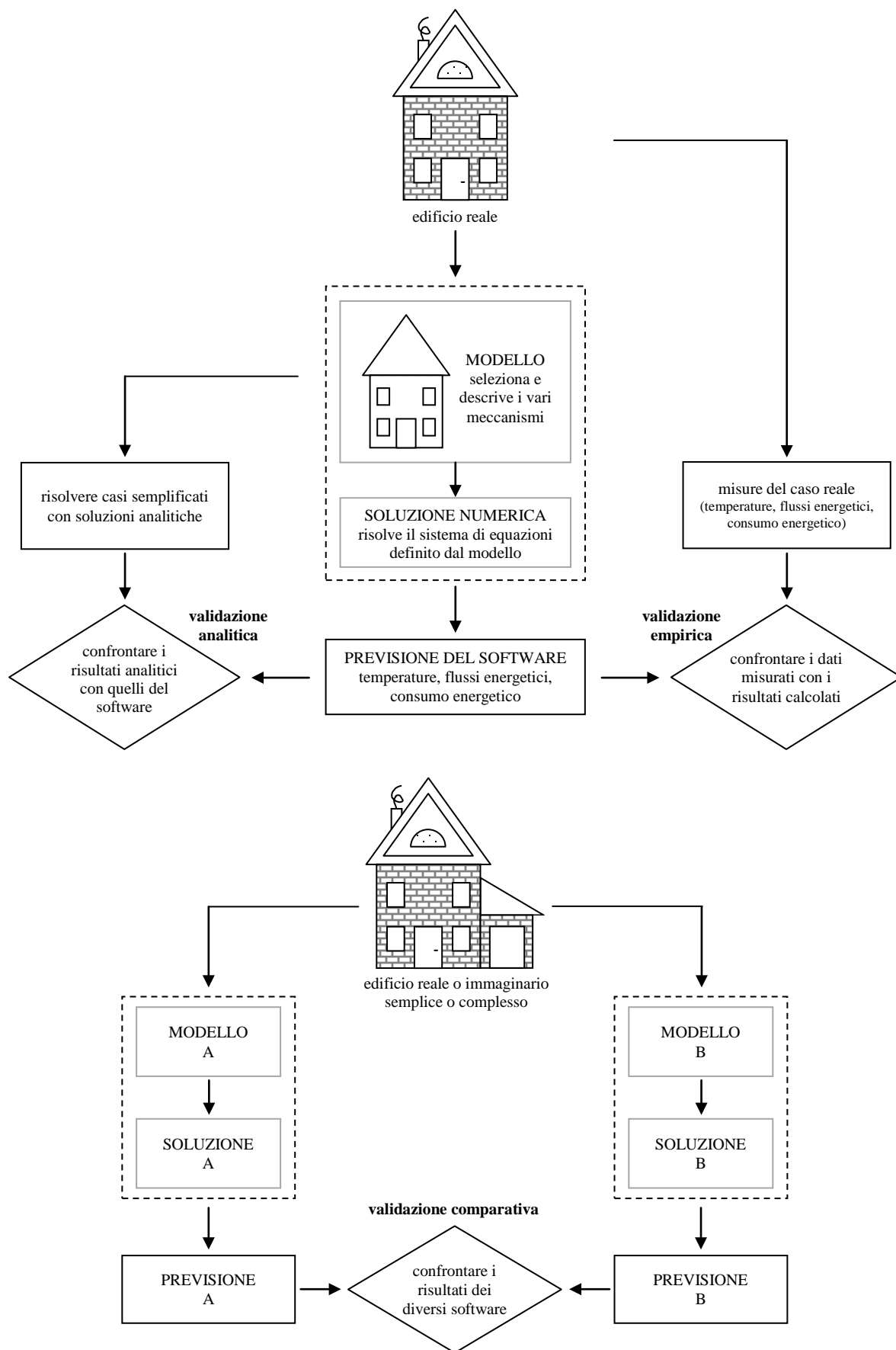


Figura 8 - Tecniche di validazione analitica, empirica, comparativa (Fonte: Judkoff, et al., 2008)

La metodologia proposta dal NREL divide ulteriormente la validazione empirica in differenti livelli di precisione. Questo si rese necessario in quanto molti degli sforzi condotti precedentemente, nonostante una spesa considerevole di risorse umane ed economiche, non produssero risultati tali da sostenere delle conclusioni definitive. I livelli di convalida dipendono dal grado di controllo esercitato sulle possibili fonti di errore in una simulazione. Queste fonti di errore sono composte da sette tipologie divise in due gruppi.

Errori esterni

- Differenze tra l'attuale microclima che interessa l'edificio e i dati meteorologici usati nel programma;
- Differenze tra l'attuale programmazione, strategie di controllo, e gli effetti dei comportamenti degli occupanti e quelli assunti dall'utilizzatore del software;
- Errori dell'utente nel derivare i file di input dell'edificio;
- Differenze tra le attuali proprietà termiche e fisiche dell'edificio, includendo i sistemi impiantistici, ed i relativi dati in ingresso scelti dall'utilizzatore.

Errori interni

- Differenze tra gli attuali meccanismi di trasferimento del calore che si manifestano nell'edificio reale e nel suo impianto di climatizzazione e il modello semplificato usato per simulare questi processi fisici;
- Errori o imprecisioni nella soluzione dei modelli matematici;
- Errori nel sorgente del software.

Nel livello più semplicista, l'attuale utilizzo di energia nel lungo periodo viene confrontata con quello calcolato dal software, senza alcun tentativo di eliminare le fonti di discrepanza. Molti utenti preferiscono questo livello poiché è molto simile all'attuale utilizzo nel campo industriale – lavorativo di questi strumenti di previsione, tuttavia risulta difficile l'interpretazione dei risultati di questo tipo di esercizi di validazione in quanto tutte le possibili cause di errore operano simultaneamente. Sebbene si sia raggiunto un buon accordo tra le prestazioni simulate e quelle misurate, la possibilità di errori di compensazione impedisce il raggiungimento ad una conclusione definitiva per quanto riguarda l'accuratezza del modello.

Si possono ottenere più livelli informativi di convalida mediante il controllo o l'eliminazione delle varie fonti di errore, o delle loro combinazioni, e aumentando il numero di dati direttamente confrontabili con quelli misurati sul campo (es. confrontando la temperatura degli ambienti o il consumo energetico sia su base stagionale che su scala oraria).

Nel livello più dettagliato, tutte le sorgenti di errore conosciute sono controllate al fine di identificare e quantificare altre fonti di errore attualmente incognite, e per rivelare il rapporto causa-effetto tra le diverse fonti di errore.

Questo stesso principio generale si applica sia ai metodi di validazione analitica che alle tecniche di convalida comparativa. Il banco di prova più realistico è il più difficile per stabilire cause ed effetti e per diagnosticare i problemi, quello più semplice e controllato invece è il più facile al fine di individuare le diverse fonti di errore o altre inesattezze.

3.1.1 Principali estrapolazioni adottate

Ogni confronto tra le prestazioni misurate e quelle calcolate rappresenta una piccola regione in un immenso spazio n-dimensionale di parametri. Praticamente, siamo costretti a esplorare relativamente poche regioni all'interno di questo spazio, ma vorremmo essere certi che i risultati non siano casuali e rappresentino la validità della simulazione anche nelle regioni rimanenti. Le tecniche analitiche e comparative minimizzano l'incertezza delle estrapolazioni che si devono compiere, limitando così il numero di test pratici che si devono condurre.

La Tabella 4 classifica tali estrapolazioni.

Dati noti o misurabili	Estrapolazioni	Commenti
Qualche zona climatica	Molte zone climatiche	Praticamente è impossibile eseguire i test con qualunque condizione meteorologica, si devono pertanto selezionare i climi più rappresentativi e differenti al fine di stressare i diversi meccanismi di trasmissione del calore.
Totale consumo energetico di breve periodo (mensile)	Totale consumo energetico di lungo periodo (annuale) o viceversa	Praticamente risulta troppo oneroso eseguire test di lungo periodo (annuali), pertanto molti parametri devono essere testati nel breve periodo. Sfortunatamente i test di breve periodo tendono a non esaltare piccoli errori additivi, e permettono di stressare solo certi meccanismi di trasmissione del calore.
Temperature e/o flussi di calore di breve periodo (su base oraria o inferiore)	Totale fabbisogno energetico di lungo periodo o viceversa	È difficile dire quali effetti comportino le discrepanze delle temperature di breve periodo sull'accuratezza della previsione dei consumi energetici. Es. se la temperatura calcolata oscilla all'interno della banda morta superando saltuariamente i limiti di accensione / spegnimento dell'impianto, mentre quella effettiva supera più frequentemente tali limiti, il consumo energetico previsto sarà minore di quello reale e viceversa.
Alcuni punti prestazionali degli impianti	Molti punti prestazionali degli impianti	Sarebbe troppo oneroso realizzare gli stessi test, con lo stesso livello di strumentazione e controllo, in un grande impianto commerciale rispetto ad uno residenziale oppure per tutti i modelli di tutti i costruttori.
Alcuni edifici che rappresentino qualche serie di variabili miscelate	Molti edifici che rappresentino molte serie di variabili miscelate	È improponibile eseguire dei test di simulazione in ogni tipo di costruzione, questo eliminerebbe il bisogno della simulazione stessa poiché si sarebbe già in possesso dei dati per ogni edificio da simulare. Di conseguenza, si dovranno selezionare quelle configurazioni che stressano quei meccanismi più rappresentativi del maggior parte degli edifici.
Piccola scala: semplici celle di prova, edifici, sistemi meccanici, esperimenti di laboratorio	Larga scala: edifici complessi con impianti HVAC complessi o viceversa	Sarebbe troppo costoso realizzare gli stessi test, con lo stesso livello di strumentazione e controllo, in un grande edificio commerciale rispetto ad una più piccola abitazione. Sarà l'abilità dell'utente che andrà ad investigare se nei due casi si manifestano gli stessi meccanismi di trasmissione termica così da poter individuare il modello più idoneo.

Tabella 4 - Tipi di estrapolazioni (Fonte: adattamento da Neymark, J. e R. Judkoff, 2002)

3.1.2 Metodologia globale di validazione

La Figura 9 mostra un processo col quale è possibile usare congiuntamente la tecnica analitica, empirica e comparativa in modo tale da sfruttare i vantaggi dell'uno e dell'altro approccio. Praticamente non esiste una procedura migliore di un'altra per quanto riguarda l'utilizzo delle varie tecniche, ad esempio il confronto tra più modelli può essere eseguito prima della validazione empirica al fine di definire con maggior precisione l'obiettivo delle successive prove di validazione e aiuta a stimare l'incertezza sperimentale dovuta alla propagazione di tutte le sorgenti di errore note attraverso uno o più software di simulazione energetica. L'esecuzione della validazione empirica prima di altre è consigliabile in quanto è l'unica tecnica che consente un confronto con la realtà fisica dei processi di trasmissione del calore, tuttavia a causa dell'elevato dispendio sia di risorse umane che economiche si preferisce limitare il suo utilizzo a delle casistiche ben definite.

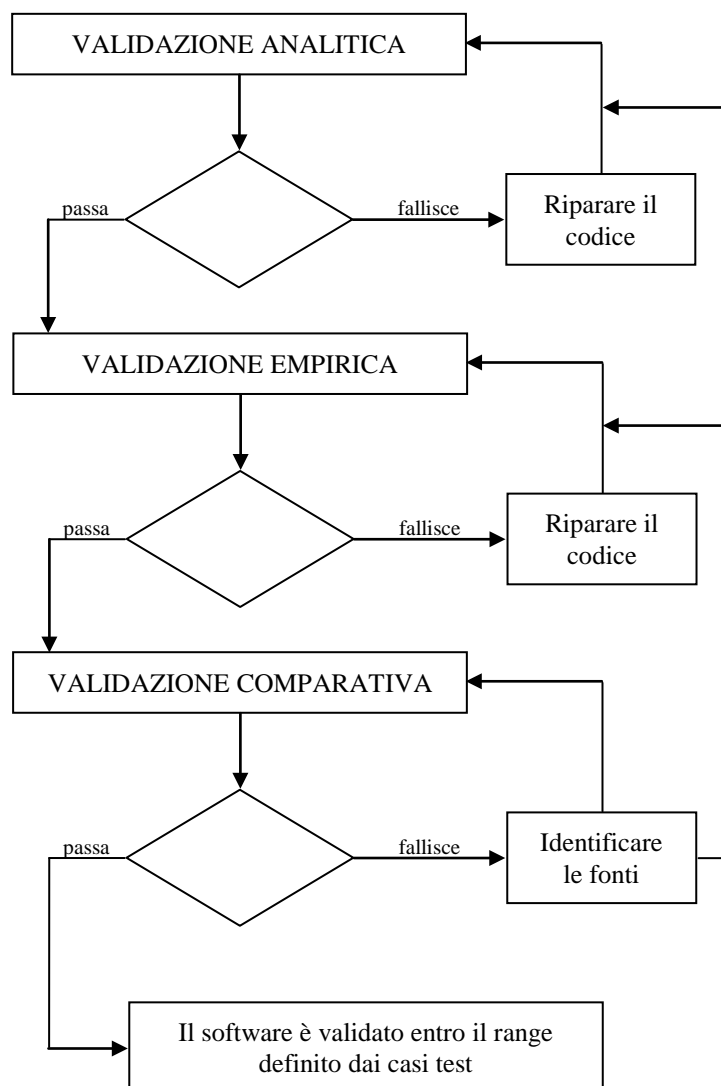


Figura 9 - Metodo di validazione (Fonte: Judkoff, R. e J. Neymark, 2006)

Nel percorso mostrato in Figura 9, il primo passo consiste nell'esecuzione del codice di calcolo secondo le modalità definite dal caso di prova analitica. Questo consente di verificare la soluzione matematica dei principali modelli di trasferimento del calore pur rimanendo nel campo dei casi test più economici, qualora si individui una discrepanza tra i risultati della simulazione e quelli forniti

dal metodo analitico si dovrà provvedere alla riparazione del codice prima di eseguire qualunque altro tipo di verifica.

Nel secondo step si lancia il codice di calcolo ed in seguito si procede al confronto dei risultati con quelli forniti dall'investigazione empirica dove si sono misurati, il più precisamente possibile in relazione alla loro influenza sulla previsione finale, sia i parametri di output (es. temperatura, fabbisogno energetico) che quelli di input (es. radiazione solare, velocità del vento, parametri prestazionali dei materiali da costruzione). L'individuazione delle fonti di errore può risultare molto difficoltoso e costituisce tuttora un campo in continua esplorazione negli ambienti di ricerca. Le tecniche comparative possono essere usate per creare delle procedure di diagnosi e per definire più precisamente i successivi esperimenti sperimentali.

L'ultimo passo coinvolge l'esecuzione di più codici di calcolo seguita dal controllo e un confronto diretto tra i risultati ottenuti. Al fine di eseguire una verifica il più precisa possibile, nella selezione dei software da confrontare è preferibile operare con programmi che abbiano già superato altri studi di validazione e che utilizzino modelli per la rappresentazione della realtà diversi. I casi in cui le previsioni degli applicativi a confronto divergano, indicano le aree che richiedono un'ulteriore investigazione.

Qualora un programma completi con successo questi tre stadi, li consideriamo validati per i domini di applicazione nei quali è stata riscontrata una buona conformità tra la realtà e i risultati previsionali, ovvero i software sono "validi" nel range di edifici e zone climatiche rappresentate dai casi test e limitatamente all'attuale stato dell'arte nel campo informatico e nel campo degli strumenti di misura. Un software di simulazione pertanto non è in grado di rappresentare fedelmente la realtà in ogni suo aspetto ed in qualunque situazione.

3.2 Necessità normativa di validare un codice

I report contenenti una serie di casi test, come le prove descritte nell'ASHRAE Standard 140 o i vari BESTEST sui quali si basa, sono citati e vengono usati da un crescente numero di specialisti per la promulgazione di leggi o altre normative di carattere energetico - prestazionale.

L'ASHRAE Standard 90.1 prevede che i software utilizzati per dimostrare la conformità con le prestazioni energetiche definite nello stesso, devono essere testati utilizzando l'ASHRAE Standard 140 (*Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*). L'IEA BESTEST viene usato inoltre per eseguire i test di certificazione energetica nei Paesi Bassi, Australia, Nuova Zelanda. Tutti gli stati membri della Comunità Europea devono seguire le linee normative dettate dal CEN il quale, come vedremo più avanti, in seguito all'EPBD ha promulgato diverse norme di validazione verificandone i risultati con la procedura BESTEST. Negli Stati Uniti, NASEO/RESNET ha adottato l'HERS BESTEST come base per la validazione dei software atti alla certificazione energetica degli edifici secondo lo standard promosso dalla stessa associazione nazionale.

Al fine di soddisfare la direttiva europea sul rendimento energetico (EPBD), la Germania e i Paesi Bassi hanno sviluppato la loro *Energy Diagnosis Reference* (EDR) la quale è basata sui BESTEST elaborati dall'IEA; anche il Portogallo sta utilizzando questi test come riferimento per il controllo

di qualità dei software di simulazione energetica degli edifici. Austria, Danimarca, Grecia e Paesi Bassi sono stati recentemente coinvolti in alcuni studi pilota nei quali si è avuto modo di testare il prototipo del software nato dal progetto europeo EPA-ED⁷ (*Energy Performance Assessment of Existing Dwellings*) conclusosi nel 2004. Il motore di calcolo di questo strumento incorpora degli algoritmi, alcuni dei quali sono stati verificati seguendo la procedura BESTEST, basati direttamente sulle procedure di calcolo dettate dalle norme europee disponibili.

Nel Regno Unito il *Chartered Institute of Building Services Engineers* (CIBSE)⁸ sta raccogliendo le prove per la certificazione e verifica dei software di simulazione energetica (CIBSE TM33). Le prove si focalizzano sulla necessità britannica di avere un meccanismo di regolamentazione per l'accreditamento dei modelli di analisi termica dettagliata come parte della loro approvazione formale per l'utilizzo nella metodologia di calcolo nazionale. Il CIBSE osserva che le prove TM33 sono principalmente allo scopo di infondere la fiducia degli utenti, piuttosto che fornire la convalida completa di un programma. Per coloro che intendono validare un programma più profondamente, la CIBSE Technical Memorandum 33 cita le prove e i parametri di riferimento disponibili in ASHRAE Standard 140, IEA BESTEST, ricerche e rapporti finali ASHRAE e CEN.

⁷ Per ulteriori informazioni sul progetto EPA-ED si rimanda al sito internet <http://www.epa-ed.org>

⁸ Per ulteriori informazioni si rimanda al sito www.cibse.org dal quale è possibile scaricare, previa registrazione, il CIBSE TM33.

4 STANDARD DI VALIDAZIONE

4.1 Panoramica sui principali studi di validazione

4.1.1 Verifica analitica

Nei primi anni 80, il NREL condusse molti studi di validazione analitica, empirica e comparativa focalizzandosi principalmente sui fenomeni di trasmissione del calore attraverso l'involucro edilizio, includendo conduzione termica delle pareti, trasmissione del calore attraverso le superfici vetrate, irraggiamento solare e infiltrazioni. Questi test e diversi studi comparativi hanno facilitato l'individuazione e la diagnosi di un problema di convergenza nel programma DEROB-3, che è stato poi corretto in DEROB-4, [14]. Questi studi hanno anche dimostrato una buona congruenza tra i risultati pervenuti con DOE2.1, BLAST-3, SunCat-2.4, e DEROB-4 rispetto alle soluzioni analitiche, anche se è stato osservato un notevole disaccordo in alcuni degli studi comparativi. Ciò ha confermato, nell'ambito della metodologia globale di convalida, la necessità di eseguire sia le prove analitiche che di tipo comparativo.

Ulteriore sviluppo alla convalida analitica si è verificato in Europa dove soprattutto per mezzo dell'IEA che ha promosso anche recentemente più studi di ricerca volti a sviluppare o integrare i casi test noti come BESTEST. In un documento di lavoro interno dell'IEA-SHC Task 22 (Gennaio 1996 - Dicembre 2002) sono state riportate le principali tecniche sviluppate finora. Questa collezione comprende lavori sulla conduzione termica; radiazione infrarossa; portata d'aria multi zona; ombreggiatura solare; guadagni solari; scambi radiativi ad elevata lunghezza d'onda; frangisole. Tra le pubblicazioni afferenti alla Task 22 ritroviamo i cosiddetti HVAC BESTEST dove sono inclusi alcune di queste prove di convalida analitica, altri test pubblicati dal medesimo ente fanno riferimento invece alla Task 34 (Ottobre 2003 – Dicembre 2007).

L'ASHRAE ha sponsorizzato un progetto di ricerca noto come ASHRAE 1052-RP (*Development of an Analytical Verification Test Suite for Whole Building Energy Simulation, 2001*) che ha sviluppato delle prove di validazione analitica. Questi test ricoprono la convezione, la conduzione in regime stazionario e dinamico (comprese quelle rivolte verso il terreno), radiazione solare, trasmittanza dei vetri, ombreggiatura, distribuzione solare interna, infiltrazione, a scambio radiativo infrarosso interno ed esterno, guadagni termici gratuiti. Questo lavoro riprende e sviluppa il lavoro precedente citato, e comprende alcuni nuovi casi di test. Test relativi ai sistemi a tutt'aria negli edifici commerciali invece sono contenuti in ASHRAE 865-RP (*Development Of Accuracy Tests For Mechanical System Simulations, 2002*).

4.1.2 Verifica empirica

Diversi studi di validazione sperimentale sono stati svolti sia in Europa che negli Stati Uniti i quali si sono avvalsi di differenti strutture costruite a tale scopo:

- Solar Energy Research Institute (SERI) Validation Test House in Golden, Colorado.
- National Research Council of Canada (NRCan) Test House in Ottawa, Canada
- Los Alamos National Laboratory Sunspace Test Cell in Los Alamos, Nuovo Messico (US)

- Building Research Establishment (BRE) Test Rooms in Cranfield, Inghilterra
- Electricité de France ‘ETNA’ e ‘GENEC’ Test Cells in Francia
- Iowa Energy Resource Station (ERS) Ankeny, Iowa (US)
- EMPA Test Cell in Duebendorf, Svizzera
- Double-Skin Façade (DSF) Test Facility (AAU - Aalborg University), Danimarca

I dati sono stati raccolti dalla casa test del NREL negli inverni del 1982 e 1983, due studi si sono succeduti utilizzando DOE-2.1A e BLAST-3.0.

Nel primo, basato sui dati del 1982, si sono eseguiti globalmente nove casi test: si è iniziato con un caso base dove si sono utilizzati solo valori provenienti dai manuali e si è concluso con l'ultimo caso dove si sono adoperati come dati di input i valori misurati per l'infiltrazione, temperatura del suolo, temperature interne, conduttanza termica delle superfici opache e vetrate. Le previsioni sul fabbisogno energetico per il riscaldamento fornite dai software in esame, nel primo caso si sono rivelate sovrastimate del 59% - 66% mentre nel nono caso, quando le inesattezze sui dati ingresso sono state eliminate utilizzando i valori misurati, sottostimate del 10% - 17%. Tuttavia, la radice dell'errore quadratico medio sulla temperatura prevista in realtà è stato maggiore per il caso 9, ciò indicava l'esistenza di errori di compensazione in alcuni dei programmi.

Nel secondo studio, basato sui dati del 1983, è stato utilizzato un approccio di diagnosi comparativa per determinare le fonti di disaccordo nel confronto comparativo tra i programmi (25%) e in quello sperimentale tra i programmi e dati misurati ($\pm 13\%$). Dalla diagnostica è emerso che la maggior parte del disaccordo è stato causato dagli algoritmi di modellazione solare e quelli per l'analisi dell'accoppiamento col terreno. Inoltre, il cambiamento nell'entità di incongruenza tra i risultati del 1982 e del 1983 hanno confermato l'esistenza di errori di compensazione.

Lo studio canadese sul guadagno solare diretto e quello condotto a Los Alamos si sono entrambi svolti nel contesto dell'IEA-SHC Task 8 (1982-1988). In questi studi si sono utilizzate una combinazione delle tecniche analitiche, comparative ed empiriche per determinare le fonti di incongruenza nel confronto diretto tra i risultati delle simulazioni, e nel paragone tra le previsioni e i dati misurati. Questi studi hanno dimostrato che il disaccordo aumenta nei casi in cui la forzante solare è maggiore e diminuisce nei casi dove il fenomeno di conduzione del calore è prevalentemente monodimensionale.

Lo studio BRE si è svolto nel contesto dell'*IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS) Program Annex 21* (1988-1993). Venticinque serie di risultati da 17 diversi applicativi di simulazione sono stati confrontati. La maggior parte dei programmi di simulazione sottostimava il consumo energetico, con notevoli variazioni tra vari programmi. La modellazione di convezione interna e l'influenza della stratificazione termica stati indicati come due delle cause principali per tali discrepanze. Questi dati sono stati utilizzati nella successiva ricerca per verificare l'adeguatezza dei vari modelli di convezione interna per varie condizioni dell'aria in diverse zone.

IEA-SHC Task 22

I dati francesi delle celle di prova ETNA e GENEC sono stati usati dall'IEA-SHC Task 22 (1996-2002). In tutto, dieci diversi programmi di simulazione sono stati confrontati con i risultati misurati su tre esperimenti separati. Nei primi due esperimenti con le celle ETNA, un'ideale fonte di calore

puramente convettivo è stata confrontata con un tipico riscaldamento elettrico convettivo a zona. Nel primo esperimento, la previsione della temperatura delle zone era basata sulla potenza fornita per il riscaldamento; nel secondo esperimento invece era dato il valore di set point del termostato e le simulazioni dovevano prevedere il consumo energetico. Entrambi gli esperimenti incorporavano una variazione pseudo casuale della potenza fornita e della temperatura di set point rispettivamente, e sono stati usati per verificare una nuova tecnica per la diagnosi degli errori nei modelli di analisi termica degli edifici.

Nel secondo esperimento, le previsioni di consumo energetico erano inferiori circa del 10%-30% rispetto alle misurazioni in entrambe le celle di test, al contrario nel primo esperimento i risultati si dimostrarono coerenti sebbene la temperatura simulata risultasse maggiore di quella misurata nelle varie zone. Le simulazioni (che in genere assumono un'ideale fonte di calore puramente convettiva) hanno dato una migliore congruenza con i risultati di riscaldamento convettivo sperimentali che con la stufa ideale. Le possibili ragioni di questo inaspettato risultato includono dei coefficienti di dispersione superiori a quelli specificati dalla costruzione, e dei coefficienti dei film interni maggiori a causa dell'elevato mescolamento dell'aria rispetto al caso ideale.

Nel terzo esperimento con le celle di prova GENEC l'obiettivo era quello di convalidare il calcolo dei guadagni solari attraverso superfici vetrate stimando le risultanti temperature flottanti. In questo esperimento i risultati delle simulazioni hanno mostrato un maggior scostamento dai dati misurati, rispetto agli esperimenti con le celle ETNA; tuttavia in un'analisi comparativa tra software i risultati delle simulazioni sono stati più o meno equivalenti tra loro.

IEA-SHC Task 34 / ECBCS Programme Annex 43

Nelle prove ERS, l'obiettivo del progetto era quello di valutare l'accuratezza delle previsioni sulle prestazioni di un edificio reale ed il suo impianto. Quattro software di simulazione sono stati confrontati con i risultati sperimentali sia con i sistemi a portata d'aria variabile che con quelli a portata costante. Le conclusioni indicano che, dopo il miglioramento dei modelli e delle specifiche dei test, i risultati della simulazione erano generalmente in buono accordo con i dati misurati entro l'incertezza degli strumenti.

I test sulle pareti ventilate (DSF) e sulle celle EMPA si sono svolti entrambi nell'ambito dell'IEA-SHC Task 34 Subtask E (Ottobre 2003 – Dicembre 2007) tenutasi in collaborazione con l'ECBCS Programme Annex 43.

Nelle prove sulle pareti ventilate, sono stati eseguiti due diversi esperimenti; nel primo tutte le aperture della facciata ventilata erano chiuse, contrariamente nel secondo esperimento le aperture superiori e inferiori erano aperte verso l'esterno. La maggior differenza tra i due test è che lo scambio di massa d'aria tra la cavità e l'esterno, nel secondo caso era causato dalla ventilazione naturale mentre nel primo era completamente inibito. In quest'occasione si sono confrontati i risultati sperimentali con quelli previsti da cinque diversi software di simulazione. A causa dell'elevato flusso d'aria nel secondo esperimento, è importantissimo per la validazione che la temperatura dell'aria, nell'intercapedine ventilata, calcolata sia congruente con quella misurata, in caso contrario a causa dell'elevata portata d'aria si può pervenire ad un forte errore nel bilancio termico.

Gli studi basati sui risultati del secondo esperimento, hanno mostrato che i modelli non prevedono correttamente la temperatura nell'intercapedine, e quelli che hanno raggiunto i migliori risultati possiedono ancora un errore di 1-5°C. Infine, gli scostamenti dai dati empirici nei periodi di maggior radiazione solare sono molto più significativi, solo nel periodo senza radiazione solare si è raggiunto un buon accordo tra i risultati sperimentali e quelli calcolati.

Nel primo caso, il quale non coinvolge lo scambio di massa nella cavità, si è ottenuto una buona approssimazione dei dati misurati nei periodi col picco di radiazione solare con diversi modelli. Tuttavia, questi modelli ancora non concordano quando si confrontano altri parametri come la potenza di riscaldamento / condizionamento, temperature superficiali, ecc.

Lo scopo degli studi realizzati con le celle EMPA⁹ era quello di creare una serie di dati da usare per la valutazione dell'accuratezza dei modelli per le superfici vetrate e le finestre con o senza dispositivi ombreggianti. Globalmente, si sono condotti una serie di otto esperimenti con complessità progressivamente crescente, i primi due erano preposti all'individuazione dei parametri fisici della cella test mentre i successivi sei esperimenti si sono svolti coi carichi solari.

I primi due esperimenti si sono svolti senza apporti solari in modo da poter specificare dettagliatamente le proprietà termofisiche della struttura, includendo i ponti termici. Il primo si è svolto in regime stazionario che, in congiunzione con un software di simulazione 3D, ha permesso di quantificare e descrivere i ponti termici. Nel secondo esperimento, alla temperatura dell'aria interna era permessa la fluttuazione in risposta ad una sorgente di calore pseudo casuale. Questo esperimento è stato simulato con sette programmi di simulazione, i risultati calcolati permisero di concludere che le caratteristiche della cella test individuate siano molto accurate al fine della validazione.

Prima della sperimentazione sull'irraggiamento solare, un esercizio preliminare è stato effettuato per identificare, in ogni programma, il modello più accurato per l'analisi della radiazione incidente sulle superfici. Una serie di test sempre più complessi, è stata poi realizzata per valutare i modelli di apporto solare nei software di simulazione energetica. Una unità vetrata selettiva, senza ombreggiamenti, con schermi solari interni ed esterni, una veneziana esterna, e una mini tapparella interna sono state impiegate. Un esperimento finale con una finestra (vale a dire superficie vetrata ed intelaiatura) è stata effettuata. In questi esperimenti, la potenza di riscaldamento / raffreddamento è stata aggiustata per mantenere la temperatura dell'aria quasi costante nella cella di prova.

Fino a sette software di simulazione sono stati valutati per ogni esperimento, includendo: HELIOS, EnergyPlus, DOE-2.1E, ESP-r, TRNSYS-TUD, IDA-ICE, TRNSYS-ULg. L'impatto di questi test di validazione è già stato realizzato. Finora, numerosi sono gli errori e le deficienze identificate nei riguardi della radiazione solare, superfici vetrate, ombreggiature, trasmissione del calore superficiale. Questi risultati mostrano anche che questa è una serie di dati test di qualità elevata.

⁹ Per maggiori informazioni si rimanda all'indirizzo www.empa.ch/ieatask34 dal quale è possibile scaricare la descrizione dettagliata degli esperimenti condotti e i dati raccolti per eseguire la validazione di altri software.

In generale, questi studi hanno dimostrato l'importanza di realizzare studi di validazione, con un alto grado di controllo sulle già citate fonti di errore esterne. Per questo motivo, la metodologia NREL sottolinea i seguenti punti per la validazione empirica:

- Iniziare con dei test molto semplici, prima di procedere a costruzioni più complesse.
- Utilizzare un livello di controllo dettagliato per monitorare i processi fisici tale che, idealmente, consenta una misura in grado di determinare il bilancio energetico componente per componente.
- Misurare sperimentalmente i principali parametri degli elementi costruttivi (es. coefficiente di dispersione termica complessiva in regime stazionario ed effettiva massa termica) per consentire un controllo incrociato tra le specifiche dell'edificio con quelle misurate.
- Utilizzare diverse condizioni climatiche, tipi di edifici, e modalità di funzionamento cosicché da poter verificare più domini all'interno dello spazio n-dimensionale di parametri.
- Confrontare i dati misurati con quelli calcolati usando più di scale di tempo, e sulla base dei risultati sia intermedi che finali, tra cui la temperatura ed i valori di potenza.

Questi studi hanno mostrato inoltre l'efficacia della diagnostica basata sull'utilizzo congiunto sia della tecnica empirica che di quella comparativa tra software, specialmente per l'identificazione degli errori di compensazione all'interno dei codici di calcolo.

4.1.3 Verifica comparativa

Molti sono gli studi di convalida comparativa. Tra i più autorevoli disponibili in letteratura citiamo le varie procedure BESTEST (vedi par. 4.3), inoltre ricordiamo che tutti gli studi di cui sopra sono accompagnati da una serie di simulazioni comparative basate sui dati oggetto dell'analisi.

4.1.4 Tabella riassuntiva

In conclusione di questo paragrafo, in Tabella 5 riportiamo le principali procedure di diagnostica e convalida disponibili in letteratura, suddividendole sia per il campo di applicazione (involucro edilizio, impianto HVAC, produzione energetica sul posto), che per la tecnica di validazione adottata; accanto al nome della procedura / pubblicazione è riportato anche il gruppo di lavoro che l'ha sviluppata mentre entro parentesi ritroviamo il paese di prova pilota per la nuova serie di test.

	Building Fabric	HVAC	On-site Generation Equipment
Analytical Verification	- Slab-on-Grade ground-coupling, IEA 34/43 (US)		
	- Airflow and multi-zone air, IEA 34/43 (Japan)		
	- Working Document of Task 22 Subtask A.1 Analytical Tests (Finland)	- HVAC BESTEST: cases E100-E200, Task 22 (US)	
	- ASHRAE RP-1052, TC 4.7	- HVAC BESTEST: fuel-fired furnace, Task 22 (Canada)	
	- EN ISO 13791 & 13792	- ASHRAE RP-865, TC 4.7	
	- EN 15255		
Comparative Tests and Diagnostics	- EN 15265		
	- Envelope BESTEST, IEA 12/21 (US)		
	- ASHRAE Standard 140, 2001	- HVAC BESTEST: cases E300-E545, Task 22 (US)	
	- HERS BESTEST, NREL		- Residential Cogen, Annex 42 (Canada)
	- Expanded ground coupling test cases. Task 22 (US)	- RADTEST, Task 22 (Switzerland)	
	- Multi-Zone Non-Airflow, IEA 34/43 (US)	- Hydronic Systems, IEA 34/43 (Germany)	
Empirical Validation	- Double-Façade Working Document, IEA34/43 (Denmark)		
	- ETNA/GENEC Tests, Task 22 (France)		
	- BRE/DMU Tests, IEA 12/21 (UK)	- ERS – VAV, Task 22 (US)	
	- EMPA Shading/Daylighting/Load, IEA 34/43 (Switzerland)	- ERS – Daylighting HVAC 1, Task 22 (US)	
	- ERS Daylighting HVAC 2, IEA 34/43 (US)	- ERS – Economizer Control, Task 22 (US)	- Residential Cogen, Annex 42 (Canada)
	- AAU Double-Façade Tests, IEA 34/43 (Denmark)	- TUD/ERS Hydronic Systems, IEA 34/43 (Germany)	

Tabella 5 - Panoramica sulle procedure di validazione

(Fonte: adattamento da Judkoff e Neymark, 2009 & Judkoff, 2008 & Neymark et al., 2006)

4.2 Validazione secondo norme UNI EN

In seguito alla direttiva europea sul rendimento energetico in edilizia, il CEN ha sviluppato o aggiornato oltre 50 norme incentrate sui diversi aspetti dell'EPBD e sui metodi di calcolo per l'efficienza energetica dell'intero complesso edilizio. I vari paesi membri seguono filosofie diverse in relazione ai requisiti per la procedura di calcolo. La semplicità è una delle esigenze più importanti, tuttavia è oramai consolidato che molte aree di interesse non possono essere oggetto di approcci semplificati e richiedono simulazioni svolte al calcolatore su base oraria e talvolta inferiore.

Tra le serie di norme pubblicate, ce ne sono alcune in particolare che forniscono alcuni test di validazione:

- UNI EN ISO 13791: Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione
- Criteri generali e procedure di validazione
- UNI EN ISO 13792: Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione
- Metodi semplificati
- UNI EN 15255: Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del carico sensibile di raffrescamento di un ambiente – Criteri generali e procedimenti di validazione
- UNI EN 15265: Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento degli ambienti mediante metodi dinamici - Criteri generali e procedimenti di validazione

4.2.1 Norme per la validazione dei metodi di simulazione dell'intero edificio

La UNI EN 15265 definisce un criterio per verificare l'accuratezza di previsione di un software di simulazione, questo documento è strettamente legato ad una serie di altre norme tra cui UNI EN ISO 13791, UNI EN ISO 13792 e UNI EN 15255.

Questi documenti non impongono un particolare metodo di calcolo sebbene in qualche aspetto della modellazione le ipotesi da assumere sono precise e fissate.

Il contenuto delle norme è organizzato in due parti: la prima definisce tutte le ipotesi, le condizioni al contorno e le semplificazioni che sono obbligatorie (es. i coefficienti di trasmissione superficiale del calore, fattori per la divisione della radiazione solare), la seconda parte definisce una serie di test di validazione che deve essere effettuata con un qualsiasi metodo di calcolo o software informatico, al fine di rispettare lo standard normativo. Tutte le predette norme (eccezione fatta per la UNI EN 15265) in un allegato informativo danno un esempio di metodo risolutivo che soddisfi i criteri generali e le prove di convalida della norma in questione. Con questo approccio è possibile catalogare ogni nuovo o esistente strumento di calcolo, a condizione che soddisfi le ipotesi e le condizioni al contorno di cui alla norma e superi tutti i test di validazione, in diverse classi di accuratezza.

La Tabella 6 mostra i principali parametri che devono essere considerati per eseguire le prove di convalida, mentre in Figura 10 si è riportata la stanza di prova per i vari casi di validazione che è comune a tutte e quattro le norme.

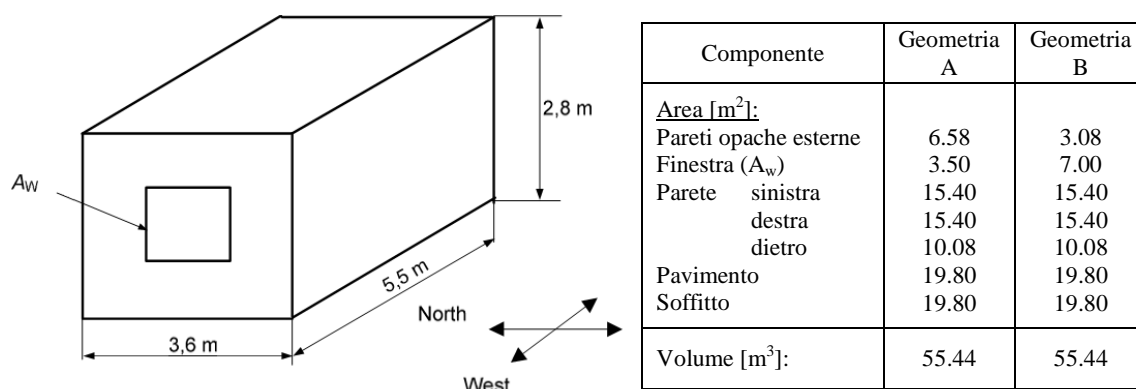


Figura 10 - Stanza di riferimento per la validazione secondo norme UNI EN
(Fonte: UNI EN ISO 13792)

Norma	Parametri
UNI EN ISO 13791 e 13792 Temperatura interna estiva in assenza di impianti di climatizzazione	<u>Componenti dell'edificio:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Conduzione termica attraverso gli elementi opachi - Scambi radiativi interni ad elevate lunghezza d'onda - Ombreggiature dovute a sporgenze, veneziane o altro <u>Stanza di riferimento (esposizione ad ovest):</u> <ul style="list-style-type: none"> - Guadagni interni di calore a profilo fisso (50% convezione / 50% radiazione) - Dimensione della finestra (grande 7.0 m² / piccola 3.5 m²) - Tipologia degli elementi vetrati (vetro singolo / doppio) - Massa termica (alta / bassa) - Tetto (presente / mancante) - Ventilazione (fissa bassa / alta, ventilazione notturna) - Condizioni climatiche esterne cicliche estive (Latitudine 40°N e 52°N)
UNI EN 15255 Carico sensibile di raffrescamento	<u>Stanza di riferimento (esposizione ad ovest, finestra grande 7.0 m²):</u> <ul style="list-style-type: none"> - Guadagni interni di calore (50% convezione / 50% radiazione) - Massa termica (alta /bassa) - Doppi vetri (con / senza dispositivi ombreggianti) - Sistema di controllo (temperatura dell'aria / temperatura operativa) - Funzionamento dell'impianto (continuo 24h / intermittente 8.00-18.00) - Ventilazione (con / senza ventilazione notturna) - Potenza massima di raffrescamento (fissa / illimitata) - Con / senza impianto di raffrescamento a superficie (pavimento o soffitto) - Condizioni climatiche esterne cicliche estive (Latitudine 52°N)
UNI EN 15265 Fabbisogno di energia per il riscaldamento degli ambienti	<u>Stanza di riferimento (esposizione ad ovest, finestra grande 7.0 m²):</u> <ul style="list-style-type: none"> - Guadagni interni di calore (20 W/ m²) - Dispositivi ombreggianti alle finestre (presente / mancante) - Tetto (presente / mancante) - Set point per il riscaldamento 20°C - Set point per il raffrescamento 26°C - Funzionamento dell'impianto (continuo 24h / intermittente 8.00-18.00) - Potenza massima di riscaldamento / raffrescamento (fissa / illimitata) - Condizioni climatiche esterne (Dati di un intero anno - latitudine 49°N, 2°E)

Tabella 6 - Panoramica sui parametri usati nei vari casi di validazione (Fonte: Zweifel, 2007)

La norma UNI EN 15265 suddivide i software di simulazione in tre diverse classi di accuratezza in base all'errore percentuale tra il fabbisogno energetico previsto e quello di riferimento (considerando separatamente il fabbisogno energetico per il riscaldamento e quello per il raffrescamento). Lo standard sul calcolo del carico sensibile di raffrescamento UNI EN 15255 invece classifica le procedure di calcolo in base alla loro abilità di modellare differenti tipi di impianti di raffrescamento, per ognuna di queste classi ci sono due sottocategorie in base al tipo di controllo che il modello può simulare. La Tabella 7 e Tabella 8 riportano queste classi.

Sistemi di raffrescamento		Classe del metodo di calcolo			
		1	2	3	4
Impianto puramente convettivo	Capacità di raffrescamento infinita, funzionamento in continuo	v	v	v	v
	Capacità di raffrescamento infinita, funzionamento in continuo o intermittente		v	v	v
	Capacità di raffrescamento limitata, sistemi di ombreggiatura mobili			v	v
Impianto convettivo + raffrescamento a superficie					v

Tabella 7 - Classificazione dei metodi di calcolo (Fonte: UNI EN 15255)

Tipo di controllo	Sottoclasse	
	a	b
Temperatura dell'aria	v	v
Temperatura operativa		v

Tabella 8 - Sottoclassificazione dei metodi di calcolo (Fonte: UNI EN 15255)

Ad esempio, un metodo di classe 3b è in grado di operare con sistemi puramente convettivi di capacità rinfrescante infinita, con funzionamento continuo o intermittente, di capacità rinfrescante fissa, con sistemi di ombreggiatura mobili, e con un controllo sulla temperatura dell'aria nella stanza o sulla temperatura operativa. Non è in grado di modellare superfici rinfrescanti.

4.3 Validazione secondo IEA BESTEST

4.3.1 IEA ENVELOPE BESTEST

Il report a cui si fa riferimento in questa sezione, disponibile in letteratura come NREL/TP-472-6231 [10], fornisce una serie di casi test per confrontare direttamente tra loro più software di simulazione dinamica e, se del caso, effettuarne la diagnostica per individuare le fonti di diversità. Questo documento è diviso in tre parti:

- Parte I) spiega i vari test e come applicare la procedura BESTEST con un approccio molto schematico se non addirittura manualistico;
- Parte II) descrive la procedura adottata per lo sviluppo, nel campo dei test svolti, e la produzione dei dati di riferimento;
- Parte III) presenta i risultati dei programmi di riferimento sotto forma di tabelle e grafici.

Globalmente, questa raccolta racchiude 36 casi test (più 4 varianti dei casi 600, 650 900 e 950, contrassegnati dal suffisso FF, nei quali la temperatura è lasciata libera di oscillare), tuttavia se un utente non è interessato ad eseguire la diagnostica deve solamente effettuare 14 test di qualificazione, le prove rimanenti sono solo per scopi diagnostici. In Tabella 9 e Tabella 10 si sono evidenziati i principali parametri afferenti ad ogni singolo test.

La sequenza nella numerazione delle prove va dal caso più semplice verso il più complesso, pertanto il caso 195 (il numero più basso) rappresenta un test diagnostico molto semplice e primitivo, mentre il caso 990 (il numero più alto) riproduce un caso relativamente realistico con un accoppiamento col terreno complesso. Le serie 600 e 900 costituiscono i test di qualificazione e quindi devono essere eseguiti per primi, tutti gli altri sono di diagnostica e vanno eseguiti secondo le modalità riassunte nei diagrammi di flusso di Figura 16 e seguenti. Un approccio alternativo, ma più oneroso, prevede prima l'esecuzione di tutti i test, e poi l'analisi dei risultati secondo la logica esposta nei predetti diagrammi.

I test di qualificazione dal 600 al 650 e dal 900 al 990 riproducono una serie di edifici a bassa e alta inerzia termica che sono relativamente realistici per quanto riguarda le loro caratteristiche termiche. Questi test verificano l'abilità di modellazione di diversi aspetti fondamentali nella dinamica degli edifici, come finestre con diversi orientamenti, sistemi ombreggianti orizzontali e verticali, ventilazione notturna con economizzatore, zona tampone soleggiata (cfr. Figura 15), accoppiamento col terreno.

Si inizia col caso 600, che è il primo caso test della serie a bassa massa termica, e si prosegue con i rimanenti della serie (dal 600 al 650). La sequenza ed il significato di queste prove è mostrata nel diagramma di Figura 16. Dopo aver inserito accuratamente tutti gli input necessari per il caso 600, i rimanenti si derivano modificando leggermente il caso base come si evince dalla Tabella 10. Ad ogni modo non si deve proseguire coi test finché le anomalie riscontrate non vengono corrette.

La geometria base è una costruzione, senza divisori interni, di volume pari a $129.6 \text{ m}^3 = 6 \times 8 \times 2.7 \text{ m}$ (volume dello spazio interno ovvero senza considerare lo spessore delle pareti) con due aperture vetrate orientate verso sud. La Figura 11 riproduce tale geometria, mentre nelle successive sono riportate le geometrie, derivate dal caso base, necessarie per l'implementazione degli altri test.

Quando gli output appaiono soddisfacenti, si procede con l'inserimento dei dati caratterizzanti il caso base 900. Gli input necessari alla specificazione dei rimanenti casi della serie 900 (dal 900 al 990) si ottengono modificando leggermente il caso base come mostrato dalla Tabella 10.

I casi addizionali con temperatura flottante (600FF, 650FF, 900FF, 950FF) devono essere comunque eseguiti come test di qualificazione, se il software possiede le caratteristiche per calcolare e fornire l'evoluzione della temperatura con passo orario. Questo comporta la modifica dell'impianto di riscaldamento / condizionamento simulato finora (nei casi 650FF e 950FF è richiesta la ventilazione meccanica).

Qualora si osservino risultati anomali, si devono seguire i percorsi diagnostici indicati nei diagrammi di flusso. La logica è sequenziale, pertanto risulta importante l'interpretazione dei risultati sia dei casi di qualificazione che di quelli diagnostici coerentemente con quanto mostrato dai diagrammi di flusso. Non viene prevista una definizione di "risultati anomali", in generale qualunque output che si discosta significativamente dai risultati di riferimento, dei quali forniamo uno scorcio nel paragrafo 4.3.1.2, deve essere verificato.

I casi diagnostici dal 195 al 320 rappresentano un tentativo per isolare gli effetti di singoli algoritmi facendo variare un solo parametro da caso a caso. Questi casi test sono relativamente primitivi allo scopo di minimizzare il numero degli scambi di calore che interagiscono tra loro e possono confondere nel processo di accertamento. Alcuni programmi potrebbero non essere in grado di eseguire alcuni di questi test in quanto non sono realistici; questo è il caso di programmi che includono algoritmi semplificati o assunzioni fissate o verifiche per l'immissione di input veritieri. I casi dal 395 al 440 cercano di risolvere questo problema presentando una serie di test alternativi che sono leggermente più realistici rispetto ai casi primitivi, anche se non sono in grado di fornire una diagnosi precisa a causa dei molteplici effetti operanti simultaneamente. Se il software non può modellare esplicitamente, implicitamente, o approssimare un effetto di una prova diagnostica, non si deve eseguire quel caso ma cercare un percorso diagnostico alternativo tramite i diagrammi. Ad esempio, se un programma non è in grado di procedere seguendo il percorso A, probabilmente si può usare efficacemente il percorso B (cfr. Figura 17). Il percorso B non è così chiaro come quello A in quanto più effetti interagiscono simultaneamente, tuttavia questi test rimangono ancora utili per individuare le probabili fonti di discrepanza.

Gli esercizi di qualificazione stessi forniscono alcune informazioni diagnostiche basate sui risultati derivati da casi individuali; la sequenzialità dei test e le differenze tra i risultati di alcuni test particolari sono alcuni dei fattori che aiutano nel processo diagnostico. Queste differenze possono essere considerate come la sensibilità di un programma in quanto esso riesce a marcare propriamente la presenza o la mancanza di alcune peculiarità dell'edificio. Ad esempio, la differenza tra i carichi estivi di una struttura dotata di sistemi ombreggianti e una sprovvista di tali apparecchi, può essere vista come indice di sensibilità dell'algoritmo per l'analisi dei carichi termici rispetto ai sistemi ombreggianti.

SETPPOINTS					OPAQUE SURFACE		OPAQUE SURFACE		GLASS [m ²]	ORIENT	SHADE [m]	COMMENTS (see note 3)
CASE	H,C,V [°C]	MASS	INTGEN [W]	ACH INFILTR	INT IR EMISSIV	EXT IR EMISSIV	INT SW ABSORPT	EXT SW ABSORPT				
195	20,20	L	0	0	.1 see note 1	.1 see note 1	NA see note 4	.1	see note 1 see note 2	S	no	Case 195 tests solid conduction
200	20,20	L	0	0	.1	.1	NA	.1	0	S	no	Do cases 200 thru 215 only if you can explicitly adjust Infra-red emissivity in your code. Cases 200, 195 test film convection algorithms. The major portion of the change in results between 200 & 195 will be from the opaque window. Increased differences between codes will be from the different film algorithms.
210	20,20	L	0	0	.1	.9	NA	.1	0	S	no	Cases 210,200 test ext ir with int ir off
215	20,20	L	0	0	.9	.1	NA	.1	0	S	no	Cases 220,215 test ext ir with int ir on Cases 215,200 test int ir with ext ir off
220	20,20	L	0	0	.9	.9	NA	.1	0	S	no	Cases 220,210 test int ir with ext ir on Case 220 is base for 230 – 270
230	20,20	L	0	1	.9	.9	NA	.1	0	S	no	Cases 230,220 test infiltration
240	20,20	L	200	0	.9	.9	NA	.1	0	S	no	Cases 240,220 test internal gaing
250	20,20	L	0	0	.9	.9	NA	.9	0	S	no	Cases 250,220 test exterior solar absorptance/incident solar
270	20,20	L	0	0	.9	.9	.9	.1	12	S	no	Cases 270,220 test south solar transmittance/incident solar.
280	20,20	L	0	0	.9	.9	.1	.1	12	S	no	Cases 280,270 test cavity albedo
290	20,20	L	0	0	.9	.9	.9	.1	12	S	1.0mH	Cases 290,270 test south horizontal overhang.
300	20,20	L	0	0	.9	.9	.9	.1	6.6	E,W	no	Cases 300,270 test East & West solar transmittance & incidence
310	20,20	L	0	0	.9	.9	.9	.1	6.6	E,W	1.0mHV	Cases 310,300 test East & West overhang & fins
320	20,27	L	0	0	.9	.9	.9	.1	12	S	no	Cases 320,270 test thermostat deadband

NOTE 1:

Cases with 0 glass area (except case 195 & 395) have a “High Conductance Wall” in place of the window and with the same area as the window.

Case 195 has neither a window, now a “High Conductance Wall”, but consists of 100% normally insulated wall as specified for the light-weight case.

NOTE 2:

The “High Conductance Wall” has the same exterior & interior IR emissivity, and the same solar absorptivity as specified for the normal wall in each case.

The “High Conductance Wall” surface texture s very smooth (like glass).

NOTE 3: TITLES

H=Heating, C=Cooling, V=Venting / L=Lightweight, H=Heavyweight

INTGEN 200 means a constant heat input of 200W (60% radiant, 40% convective)

ACH INFILTR= Air Changes per Hour Infiltration / INT=Interior, EXT=Exterior

EMISSIV=Emissivity, SW=ShortWave, ABSORPT=Absorptivity

ORIENT=Orientation, S=South, EW=East & West / SHADE=Window shading devise,

1.0mH=1meter deep Horizontal shade, HV=combination Horizontal & Vertical shade

NOTE 4:

Interior short wave absorptance doesn’t matter when glass area is 0.

Tabella 9 - BESTEST: descrizione dei test di diagnostica con bassa massa termica (Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)

SETPOINTS					OPAQUE SURFACE		OPAQUE SURFACE		GLASS [m ²]	ORIENT	SHADE [m]	COMMENTS (see note 2)
CASE	H,C,V [°C]	MASS	INTGEN [W]	ACH INFILTR	INT IR EMISSIV	EXT IR EMISSIV	INT SW ABSORPT	EXT SW ABSORPT				
395	20,27	L	0	0	.9	.9	NA	.1	see note 3	S	no	Case 395 tests solid construction
400	20,27	L	0	0	.9	.9	NA	.1	0	S	no	Cases 400,395 test surface convection (see note 4)
410	20,27	L	0	.5	.9	.9	NA	.1	0	S	no	Cases 410,400 test infiltration
420	20,27	L	200	.5	.9	.9	NA	.1	0	S	no	Cases 420,410 test internal heat generation
430	20,27	L	200	.5	.9	.9	NA	.6	0	S	no	Cases 430,420 test exterior solar absorptance & incident solar
440	20,27	L	200	.5	.9	.9	.1	.6	12	S	no	Cases 430,420 test interior solar absorptance & cavity albedo
600	20,27	L	200	.5	.9	.9	.6	.6	12	S	no	Cases 600,430 test south solar transmission
610	20,27	L	200	.5	.9	.9	.6	.6	12	S	1.0mH	Cases 610,600 test south overhang
620	20,27	L	200	.5	.9	.9	.6	.6	6.6	E,W	no	Cases 620,600 test East & West solar transmission / incidence
630	20,27	L	200	.5	.9	.9	.6	.6	6.6	E,W	1.0mHV	Cases 630,620 test East & West overhangs & fins
640	SETBACK	L	200	.5	.9	.9	.6	.6	12	S	no	Cases 640,600 test night setback
650	.27,V	L	200	.5	.9	.9	.6	.6	12	S	no	Cases 650,600 test venting
800	20,27	H	200	.5	.9	.9	NA	.6	0	S	no	Cases 800,430 test normal mass with no transmitted solar
810	20,27	H	200	.5	.9	.9	.1	.6	12	S	no	Cases 810,900 test interior solar absorptance & mass interaction
900	20,27	H	200	.5	.9	.9	.6	.6	12	S	no	Cases 900,600 test thermal mass & solar interaction
910	20,27	H	200	.5	.9	.9	.6	.6	12	S	1.0mH	Cases 910,900 test south overhang / mass interaction
920	20,27	H	200	.5	.9	.9	.6	.6	6.6	E,W	no	Cases 920,900 test East & West transmittance / mass interaction
930	20,27	H	200	.5	.9	.9	.6	.6	6.6	E,W	1.0mHV	Cases 930,920 test East & West shading / mass interaction
940	SETBACK	H	200	.5	.9	.9	.6	.6	12	S	no	Cases 940,900 test setback / mass interaction
950	.27,V	H	200	.5	.9	.9	.6	.6	12	S	no	Cases 950,900 test venting / mass interaction
960	2ZONE SS	See specification in text of the reference document (NREL/TP-472-6231)										Case 960 tests passive solar / interzone heat transfer
990	GROUND COUPLED	See specification in text of the reference document (NREL/TP-472-6231)										Case 990 tests ground couplig
600FF	NONE	NOTE 1: These cases labeled FF (Free-Float) are exactly the same as the non FF cases except there are no mechanical heating or cooling systems. Thus the interior temperatures are allowed to free-float. NOTE 2: For explanation of TITLES see note 3 at bottom of previous table.						NOTE 3: Case 395 has neither a window, nor an “opaque window”. It consists of 100% normally insulated wall as specified for the light-weight cases. NOTE 4: Cases 400,395 test surface convection and IR radiation. The major portion of the change in results will be from the opaque window. Increased differences between codes will be from the different film convection & IR algorithms.				
900FF	NONE											
650FF	NONE,V											
950FF	NONE,V											
see note 1												

Tabella 10 - BESTEST: descrizione dei test di qualificazione e dei test realistici di diagnostica (Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)

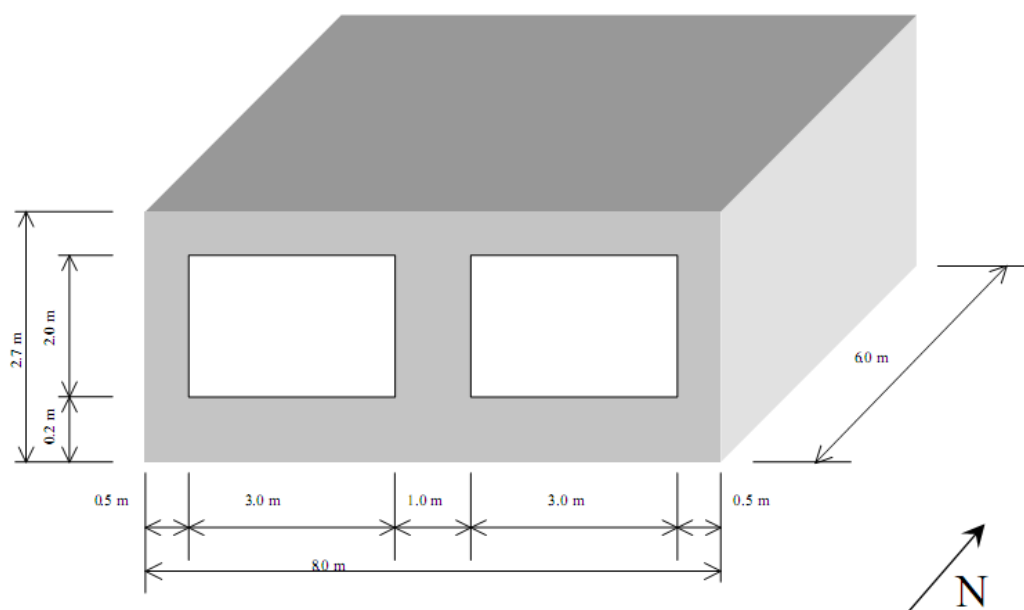


Figura 11 - BESTEST: geometria base, finestre a sud senza ombreggiatura
(Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)

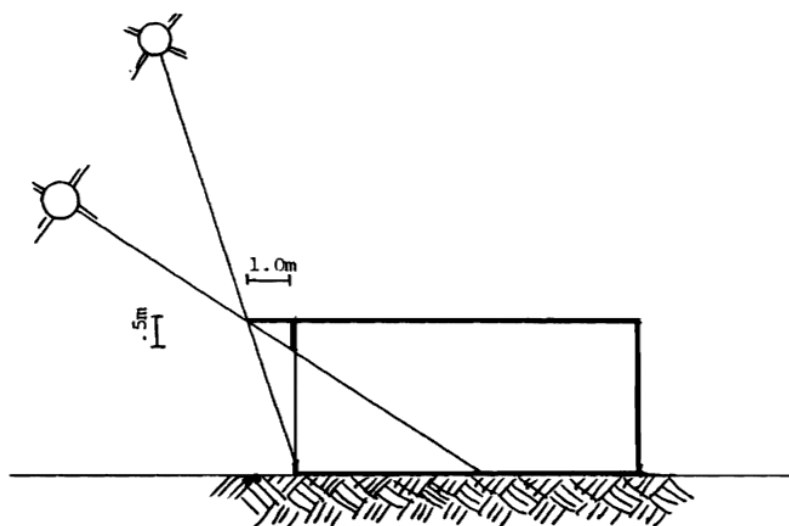


Figura 12 - BESTEST: sezione dell'edificio con aggetto ombreggiante le finestre a sud
(Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)

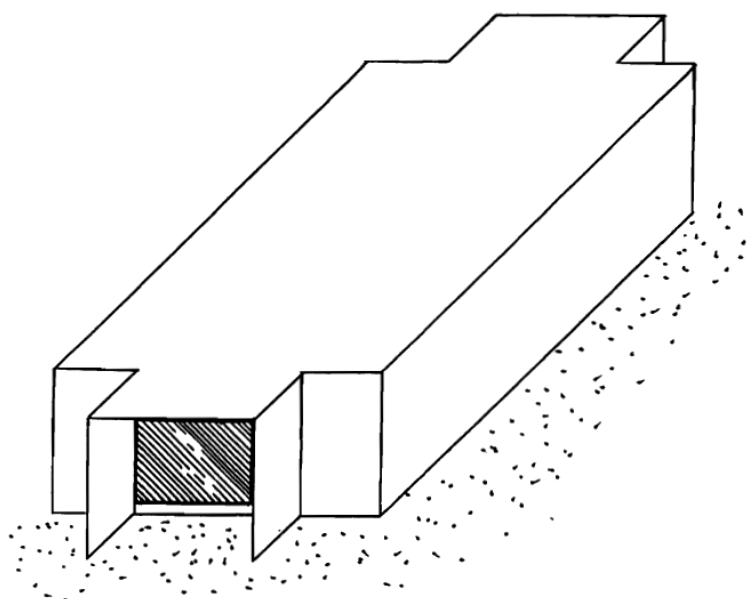


Figura 13 - BESTEST: vista assonometrica con finestre ombreggiate ad est e ad ovest
(Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)

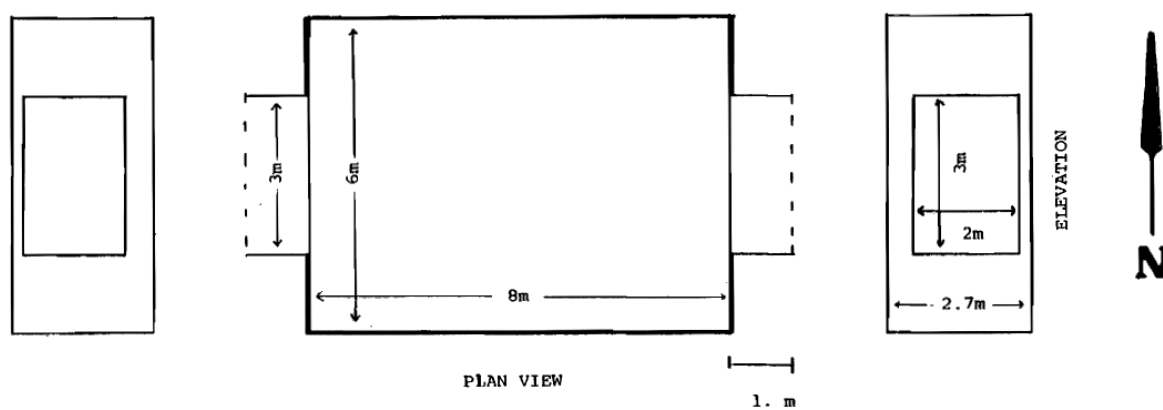


Figura 14 - BESTEST: vista in pianta con finestre ombreggiate ad est e ad ovest
(Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)

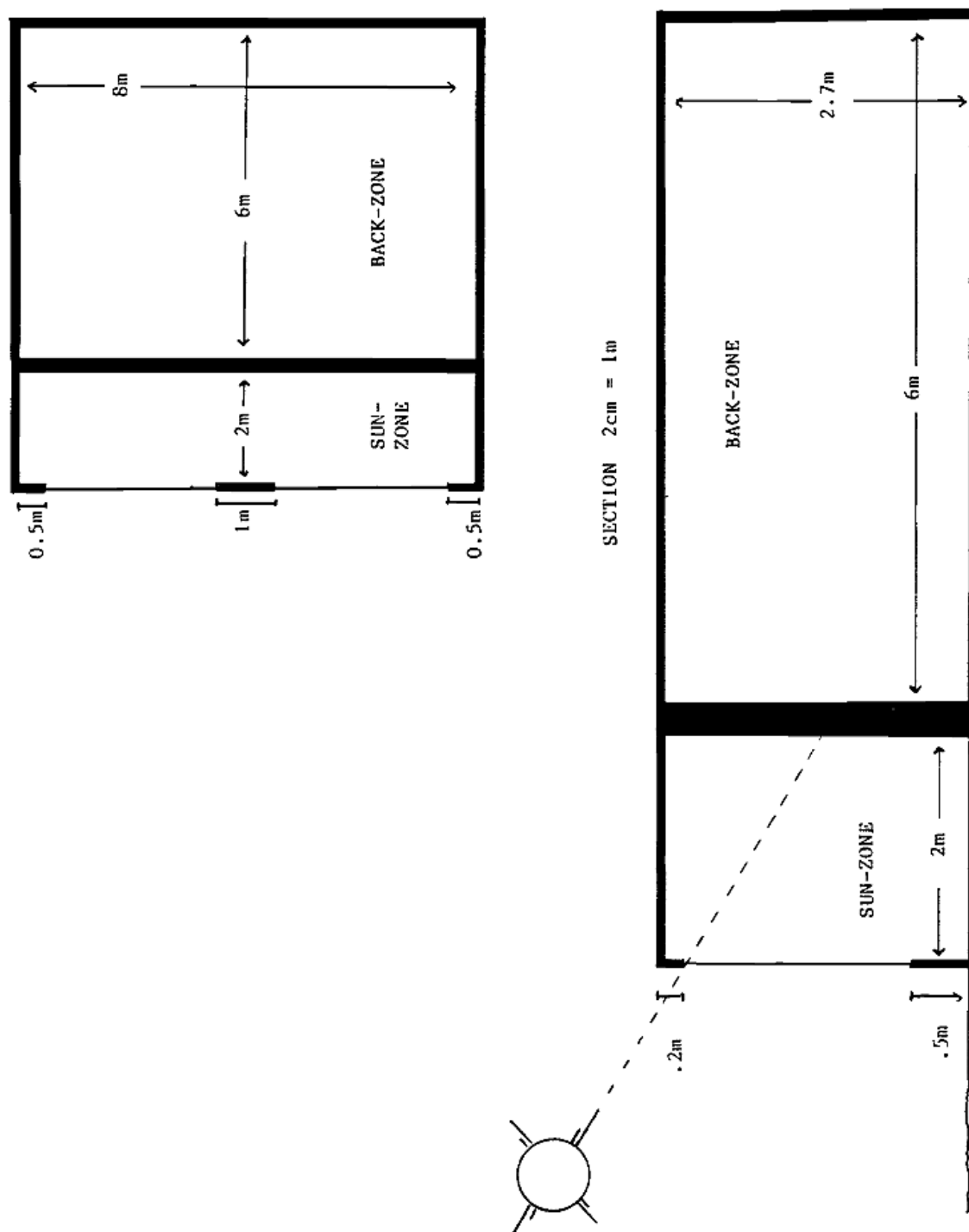


Figura 15 - BESTEST: vista in pianta e in sezione della zona tampone soleggiata
(Fonte: Judkoff e Neymark, 1995)

4.3.1.1 Diagrammi diagnostici

I diagrammi di flusso possono essere usati in due modi contrapposti. Il più potente, ma che richiede molto tempo, è quello di eseguire tutti i test e successivamente analizzare i risultati seguendo la logica diagnostica indicata nei diagrammi. Il modo che richiede meno tempo è quello di lanciare i test in sequenza, seguendo le indicazioni dei diagrammi, come descritto nel seguito.

Le figure riportate alla fine di questo paragrafo, contengono una serie di diagrammi di flusso per i test di qualificazione e di diagnostica. Questi diagrammi mostrano l'ordine da seguire per l'esecuzione dei vari test, dando una breve descrizione delle caratteristiche che vengono verificate, e indicano dove applicare la diagnostica nei casi in cui vengano riscontrati dei risultati anomali. Il primo diagramma ricopre i casi dal 600 al 650. Iniziando col caso 600, che è una semplice stanza isolata con bassa massa termica e una larga superficie vetrata rivolta a sud, se gli output del programma concordano soddisfacentemente coi risultati di riferimento (vedi par. 4.3.1.2), allora si prosegue in maniera sequenziale come specificato in Figura 16. Dopo aver completato con successo i casi test a bassa inerzia termica, si procede coi casi di qualificazione ad elevata massa (Figura 18 e Figura 19).

Per “passare” un test, un software deve mostrare una ragionevole congruenza sia nei risultati assoluti che in quelli di sensibilità dedotti coi programmi di riferimento. Ad esempio, per passare il caso 610-600 del diagramma dei test di qualificazione a bassa massa, gli output del software devono essere confrontati sia col range di riferimento del caso 610 che con quelli di sensibilità del caso 610-600. In questo report, il termine “passare” significa mostrare una ragionevole congruenza coi range di risultati ricavati con i programmi di riferimento, il termine “fallisce” invece, indica sostanzialmente la mancanza di questa congruenza.

Ci sono alcuni casi dove è possibile proseguire sebbene i problemi non siano stati scoperti dalle prove precedenti. Ad esempio, nel caso 610, l'incapacità di modellazione di un sistema con ombreggiature esterne (quali aggetti fissi), non dovrebbe comportare alcun effetto sulle capacità di simulazione degli edifici con finestre non ombreggiate. Nei casi collegati con una singola freccia, viene richiesto un risultato soddisfacente prima di continuare coi test. Ad esempio, nel caso 620, l'incapacità di modellare la radiazione trasmessa attraverso una finestra senza ombreggiature rivolta ad est, praticamente indica che il software non è in grado di proseguire con l'analisi energetica dell'intero sistema edificio-impianto. Pertanto, non ha senso proseguire finché il problema non viene risolto.

Esempio pratico

Un software passa il caso 600, ma per il caso 610 mostra una forte discordanza con le previsioni di riferimento sui carichi di raffrescamento annuali. Il diagramma di Figura 16 suggerisce un potenziale errore con l'algoritmo per l'analisi delle ombreggiature, e invita l'utente ad osservare i risultati di sensibilità che sono rappresentati dalle differenze tra i valori di output del caso 600 e 610. I diagrammi di flusso non mostrano solo l'ordine con cui eseguire i casi di verifica, ma servono anche ad interpretare i risultati e identificare le fonti degli errori. Pertanto, se un software presenta una sensibilità inadeguata per i dispositivi ombreggianti, il diagramma indica un potenziale problema nell'algoritmo per l'analisi delle ombreggiature e invita l'utente a perseguire la verifica A12 (cfr. Figura 17). La diagnostica A12 potrà confermare un problema nell'algoritmo

per gli ombreggiamenti, mentre nel caso in cui tale algoritmo sia corretto, all'utente vengono suggeriti altri tipi di test. La logica è sequenziale, ovvero fallire il caso 610-600 e passare la procedura A12, indica la presenza di errori di compensazione in alcuni degli algoritmi base sullo scambio di calore. Fallire sia il caso 610-600 che A12 conferma un problema sull'algoritmo di analisi degli ombreggiamenti.

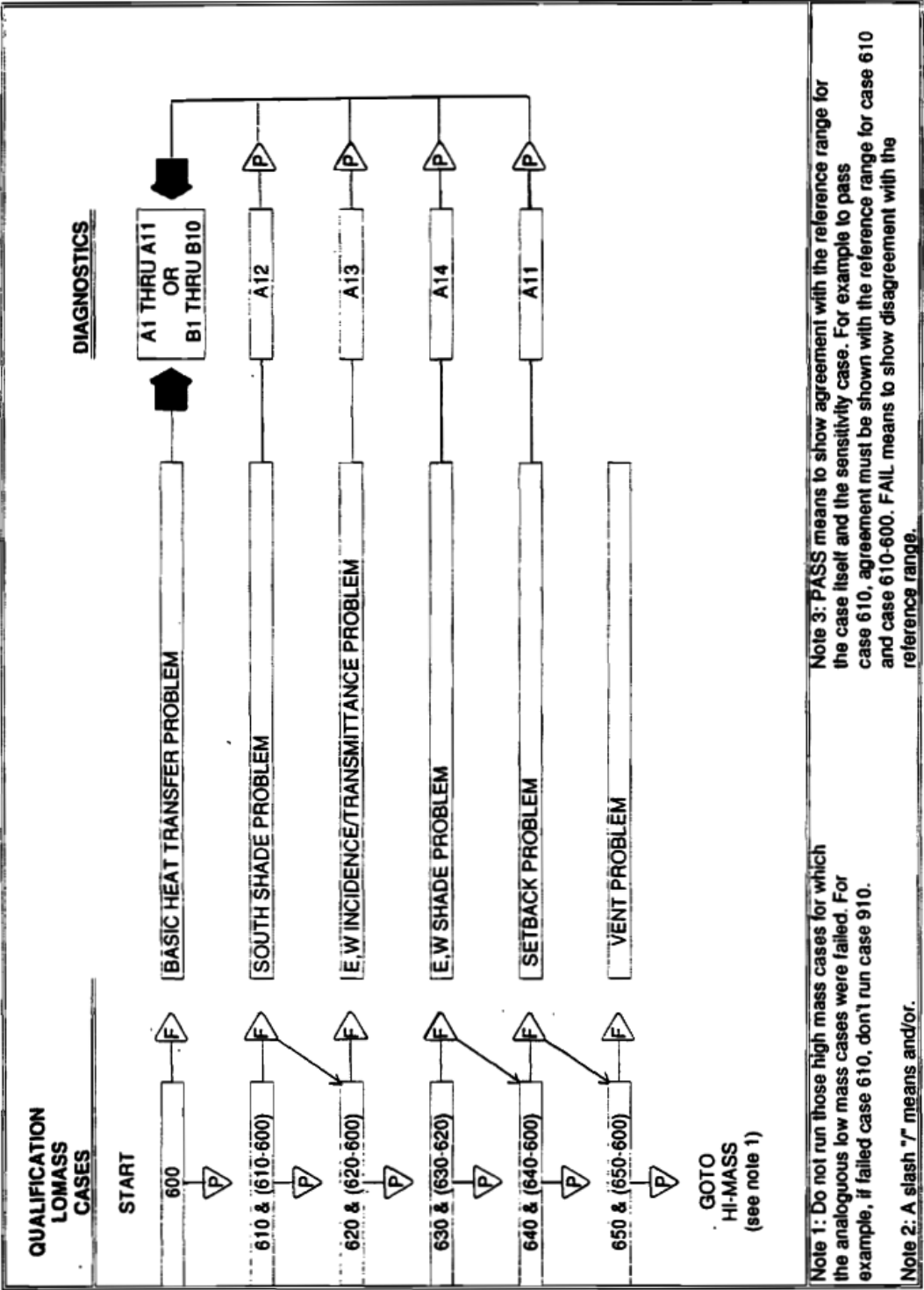


Figura 16 - BESTEST: diagnostica per i casi con bassa massa termica

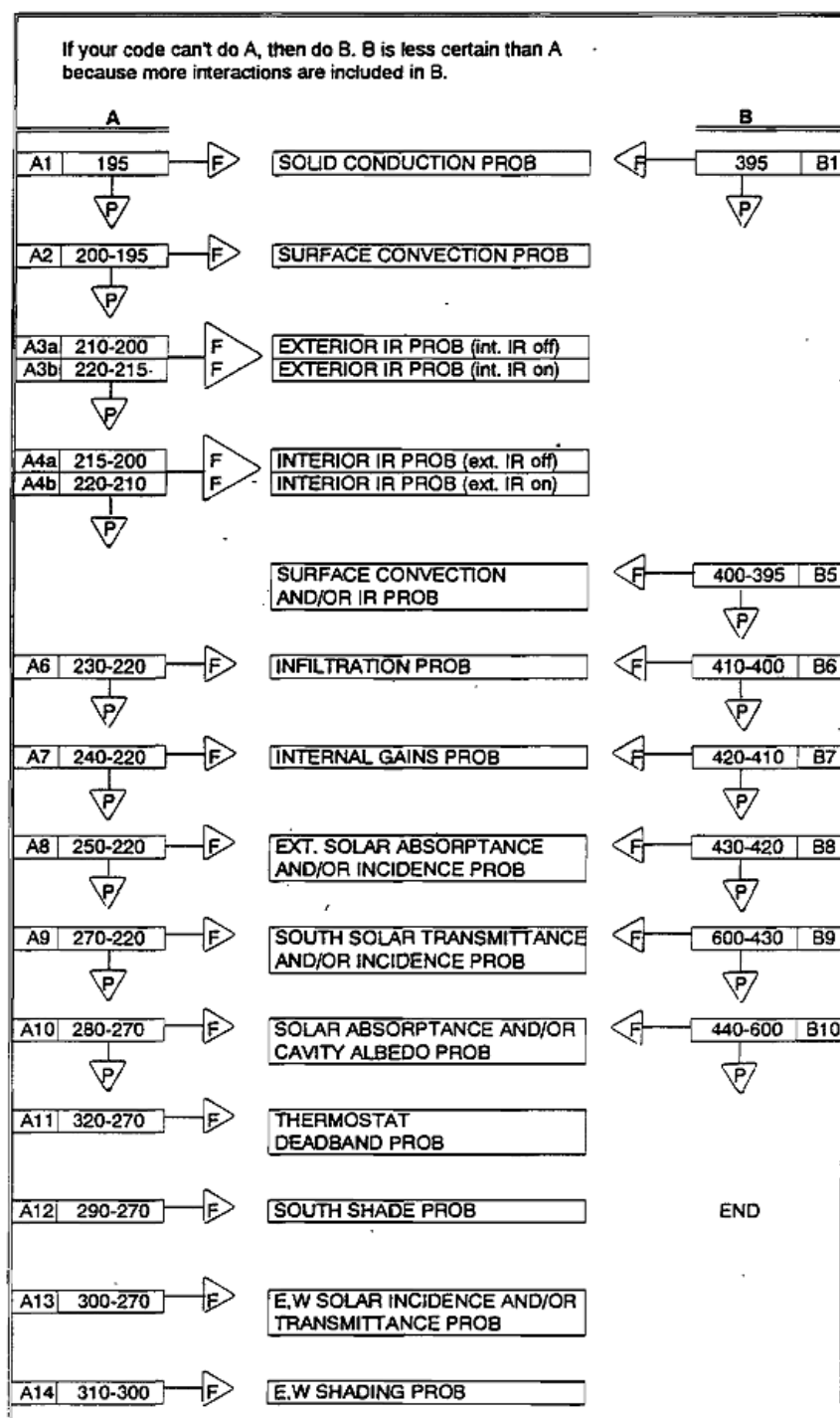


Figura 17 - BESTEST: diagnostica per i casi con bassa massa termica

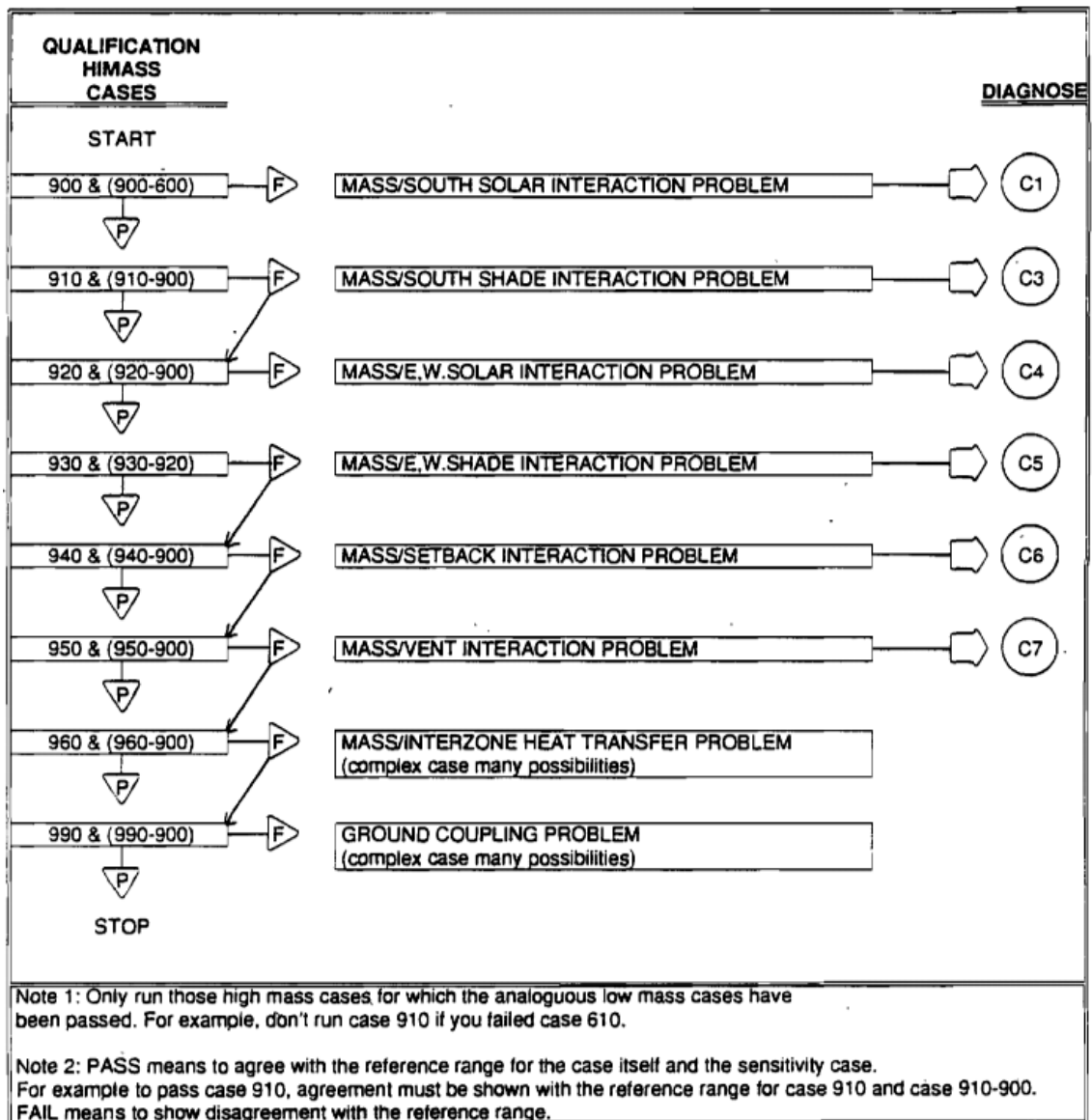


Figura 18 - BESTEST: diagnostica per i casi con elevata massa termica

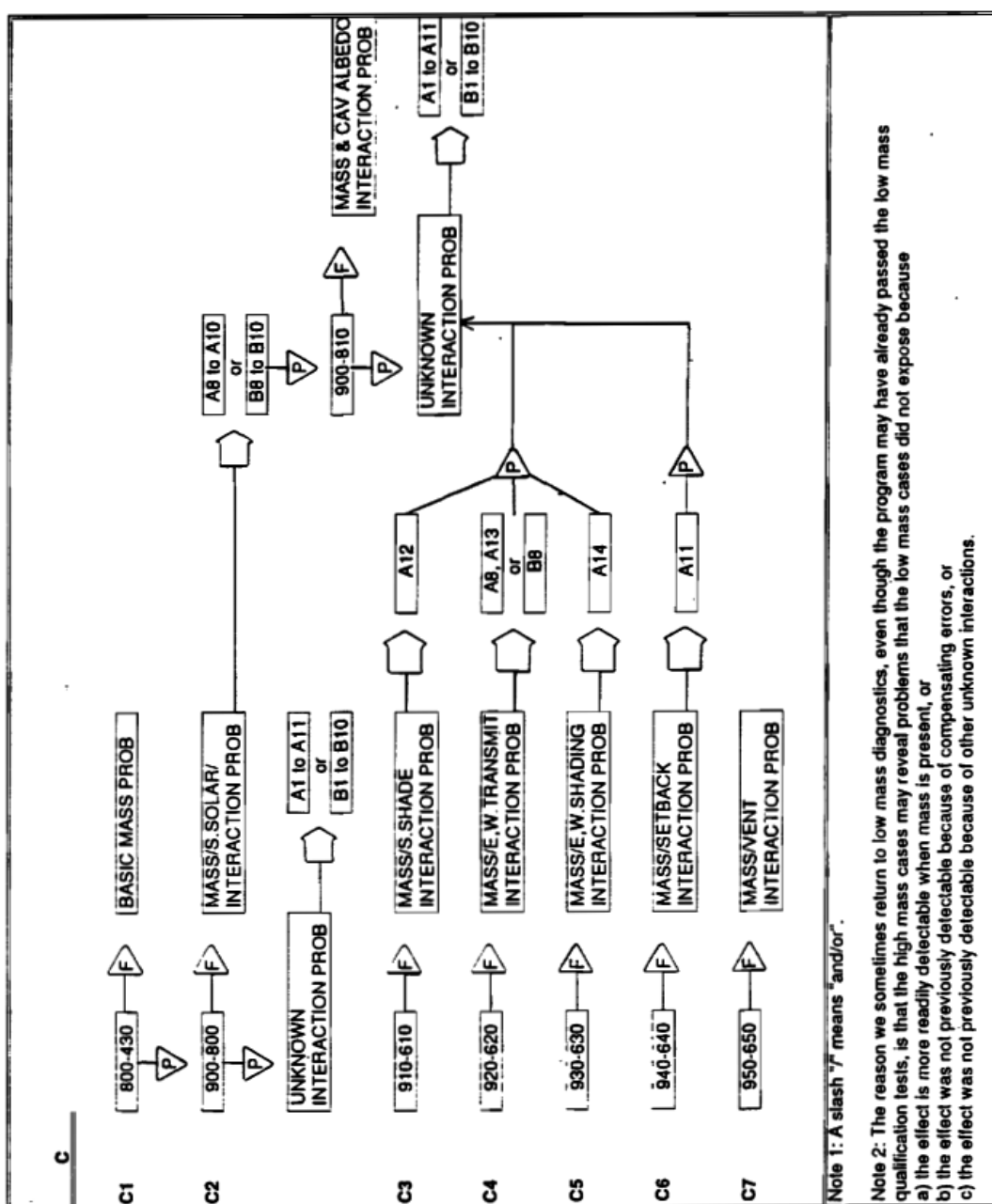


Figura 19 - BESTEST: diagnostica per i casi con elevata massa termica

4.3.1.2 Output di riferimento

I risultati finali ricavati dai programmi di riferimento (BLAST-3.0 level 193 v.1, DOE2.1D 14, ESP-R v8, SERIRES/SUNCODE 5.7, SERIRES 1.2, S3PAS, TASE, TRNSYS 13.1) sono presentati nella parte finale del report in forma tabellare e grafica. In alcuni grafici sono stati riportati i range di riferimento massimi e minimi, tuttavia si vuol ora sottolineare che questi intervalli non rappresentano uno standard di verità assoluta. Per ogni caso, se un programma cade nella mezzeria dell'intervallo non significa che sia migliore di altri che invece cadono agli estremi. I range rappresentano le differenze tra gli algoritmi considerati come i più rappresentativi dello stato dell'arte attuale (1995). Un software che cade all'esterno dell'intervallo di riferimento, sta producendo risultati differenti dai programmi esaminati in questo studio. L'investigazione delle sorgenti di queste differenze è auspicato, tuttavia l'esistenza di una difformità non significa necessariamente che il software sia sbagliato. I collaboratori di questo progetto ricordano che, sulla base della loro esperienza, quando alcuni software hanno mostrato differenze considerevoli con un range di riferimento, spesso hanno individuato un bug nel codice di calcolo, o comunque un algoritmo discutibile.

I risultati mostrano grandi difformità tra i software osservati, per molti dei casi test e dei parametri in uscita considerati. I range di riferimento riflettono questo trend, presentandosi assai ampi. In Tabella 11 si mostra, per le serie 600 e 900, la differenza assoluta tra i valori dei range di riferimento massimi e minimi e quella percentuale (rispetto alla media del range di riferimento).

Caso	$ max - min $	$\frac{ max - min }{0.5 * (max + min)} * 100$
Riscaldamento annuale – serie 600	1.3 MWh	28 %
Raffrescamento annuale – serie 600	1.7 MWh	37 %
Picco di riscaldamento – serie 600	1.0 kW	23 %
Picco di raffrescamento – serie 600	0.9 kW	17 %
Riscaldamento annuale – serie 900	0.9 kW	39 %
Raffrescamento annuale – serie 900	1.0 MWh	66 %
Picco di riscaldamento – serie 900	1.0 kW	27 %
Picco di raffrescamento – serie 900	0.8 kW	35 %

Tabella 11 - Panoramica risultati ENVELOPE BESTEST

Questa tabella indica un minor disaccordo per quanto riguarda il calcolo dei carichi di picco (dal 17% al 35%) rispetto al calcolo dei carichi annuali (dal 28% al 66%). C'è più diversità tra il calcolo dei carichi annuali di raffreddamento (dal 37% al 66%) che il calcolo dei carichi annuali di riscaldamento (dal 28% al 39%). Inoltre, generalmente sono più in disaccordo i risultati per i casi ad elevata massa (dal 27% al 60%) che quelli a bassa massa (dal 17% al 37%).

A conclusione di questa sezione, nel seguito riportiamo alcuni dei risultati di riferimento che si trovano nella III parte del documento.

ANNUAL HEATING [MWh]												
CASE	ESP UK-DMU	BLAST US/IT	DOE2 USA	SRES/SUN SUN	SERIRES UK/BRE	S3/PAS SPAIN	TRNSYS BEL/UK	TASE FINLAND	RANGE MIN	RANGE MAX	ALLCODE MAX/MIN	ALLCODE MEAN
600	4.296	4.773	5.709	5.226	5.596	4.882	4.872	5.362	4.296	5.709	1.329	5.090
610	4.355	4.806	5.786	5.280	5.620	4.971	4.970	5.383	4.355	5.786	1.329	5.146
620	4.613	5.049	5.944	5.554	5.734	5.564	5.073	5.728	4.613	5.944	1.289	5.407
630	5.050	5.359	6.469	5.883	6.001	6.095	5.624	7.018	5.050	6.469	1.390	5.937
640	2.751	2.888	3.543	3.255	3.803	3.065	3.043	3.309	2.751	3.803	1.382	3.207
650	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				0.000
900	1.170	1.610	1.872	1.897	1.988	1.730	1.655	2.041	1.170	2.041	1.744	1.745
910	1.575	1.862	2.254	2.174	2.282	2.063	2.097	2.220	1.575	2.282	1.449	2.066
920	3.313	3.752	4.255	4.093	4.058	4.235	3.776	4.300	3.313	4.300	1.298	3.973
930	4.143	4.347	5.335	4.755	4.728	5.168	4.740	6.306	4.143	5.335	1.522	4.940
940	0.793	1.021	1.239	1.231	1.411	1.179	1.080	1.323	0.793	1.411	1.779	1.160
950	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				0.000
960	2.311	2.664	2.928	2.884	2.851	2.943	3.373	2.816	2.311	3.373	1.460	2.846
990	2.222	3.448	3.425	2.972	4.324	4.301		3.813			1.946	3.501

Tabella 12 - BESTEST: risultati di riferimento - riscaldamento annuale dei casi test di qualificazione

ANNUAL COOLING [MWh]												
CASE	ESP UK-DMU	BLAST US/IT	DOE2 USA	SRES/SUN SUN	SERIRES UK/BRE	S3/PAS SPAIN	TRNSYS BEL/UK	TASE FINLAND	RANGE MIN	RANGE MAX	ALLCODE MAX/MIN	ALLCODE MEAN
600	6.137	6.433	7.079	7.278	7.964	6.492	6.492	6.778	6.137	7.964	1.298	6.832
610	3.915	4.851	4.852	5.448	5.778	4.764	4.601	5.506	3.915	5.778	1.476	4.964
620	3.417	4.092	4.334	4.633	5.004	4.011	3.901	4.351	3.417	5.004	1.464	4.218
630	2.129	3.108	2.489	3.493	3.701	2.489	2.416	1.721	2.129	3.701	2.150	2.693
640	5.952	6.183	6.759	7.026	7.811	6.247	6.246	6.508			1.312	6.592
650	4.816	5.140	5.795	5.894	6.545	5.088	5.119	5.456	4.816	6.545	1.359	5.482
900	2.132	2.600	2.455	3.165	3.415	2.572	2.485	2.599	2.132	3.415	1.602	2.678
910	0.821	1.533	0.976	1.872	1.854	1.428	1.326	1.767	0.821	1.872	2.280	1.447
920	1.840	2.616	2.440	2.943	3.092	2.457	2.418	2.613	1.840	3.092	1.680	2.552
930	1.039	1.934	1.266	2.173	2.238	1.439	1.416	0.894	1.039	2.238	2.503	1.550
940	2.079	2.536	2.340	3.036	3.241	2.489	2.383	2.516			1.559	2.578
950	0.387	0.526	0.538	0.921	0.589	0.551	0.561	0.771	0.387	0.921	2.380	0.605
960	0.488	0.666	0.428	0.803	0.718	0.643	0.411	0.786	0.411	0.803	1.952	0.618
990	1.001	1.640	1.841	1.387	0.714	0.616		1.388			2.989	1.227

Tabella 13 - BESTEST: risultati di riferimento - raffrescamento annuale dei casi test di qualificazione

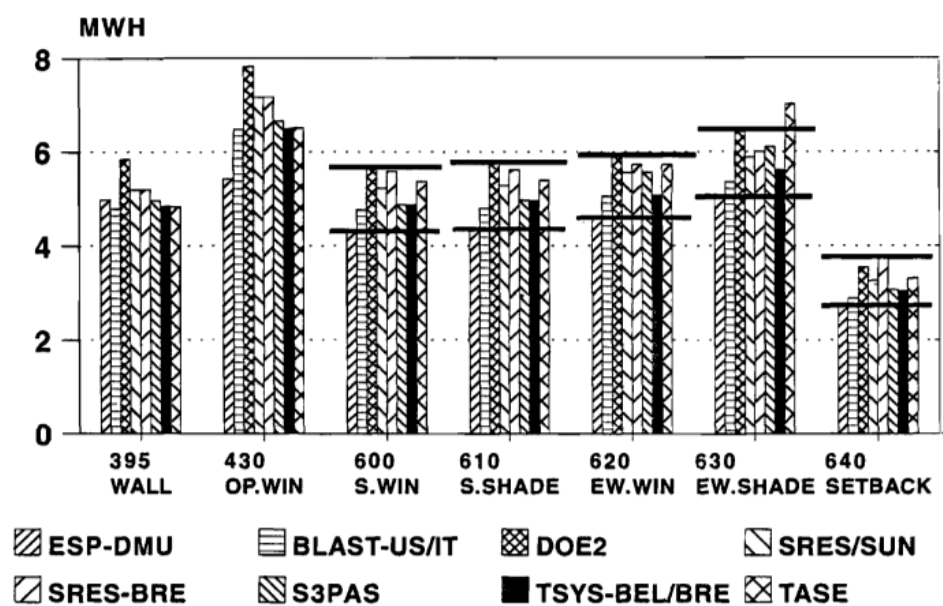


Figura 20 - BESTEST: Casi a bassa massa termica, riscaldamento annuale

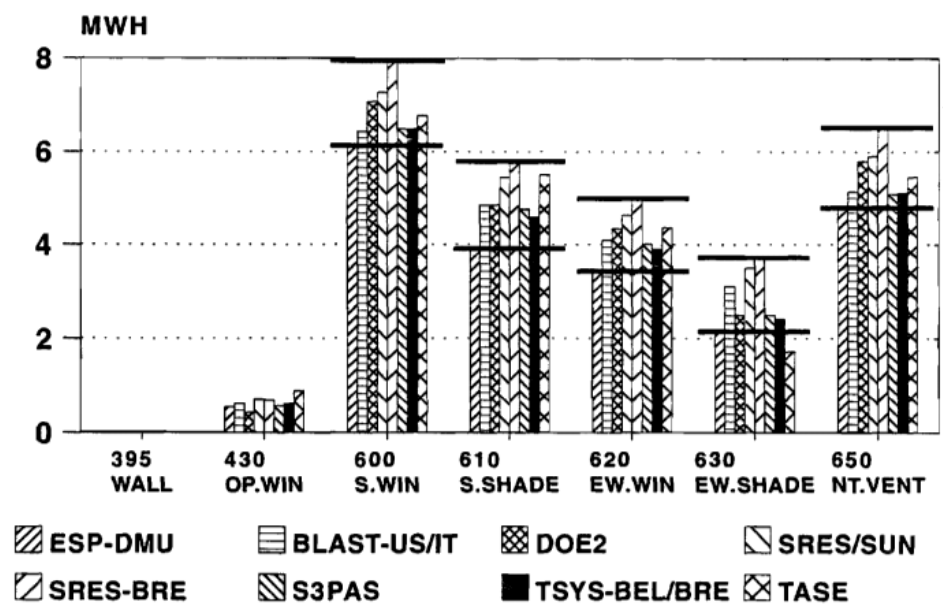


Figura 21 - BESTEST: Casi a bassa massa termica, raffrescamento annuale

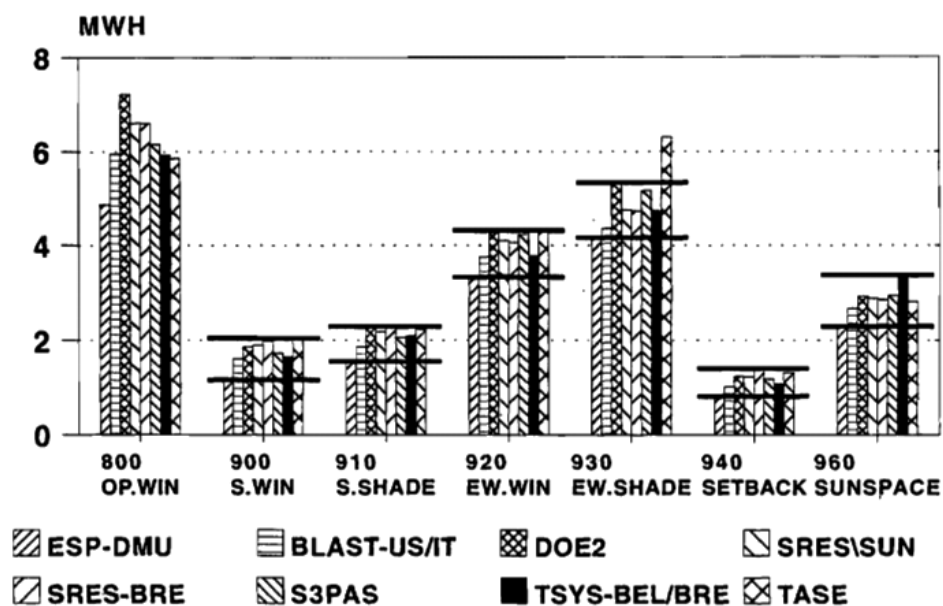


Figura 22 - BESTEST: Casi ad alta massa termica, riscaldamento annuale

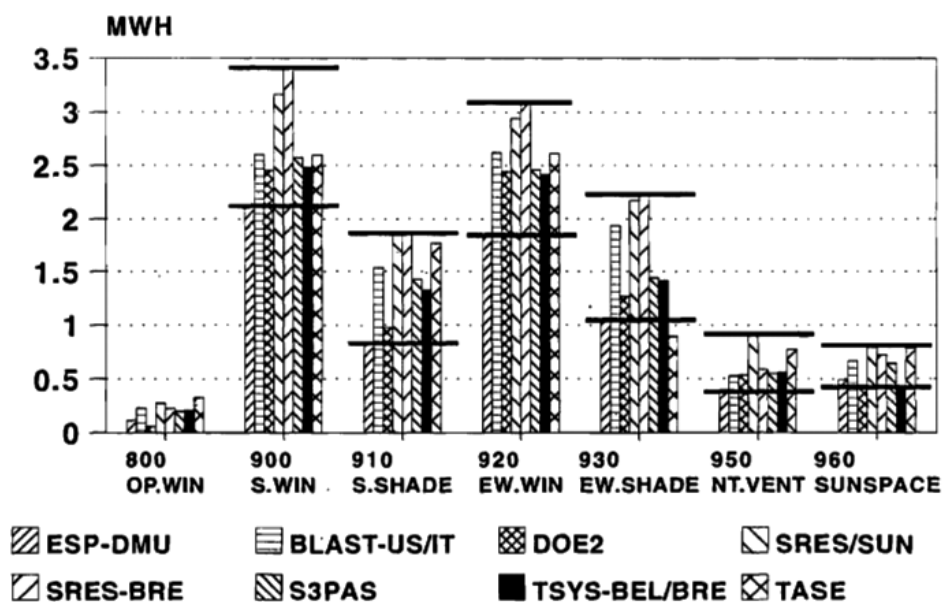


Figura 23 - BESTEST: Casi ad alta massa termica, raffrescamento annuale

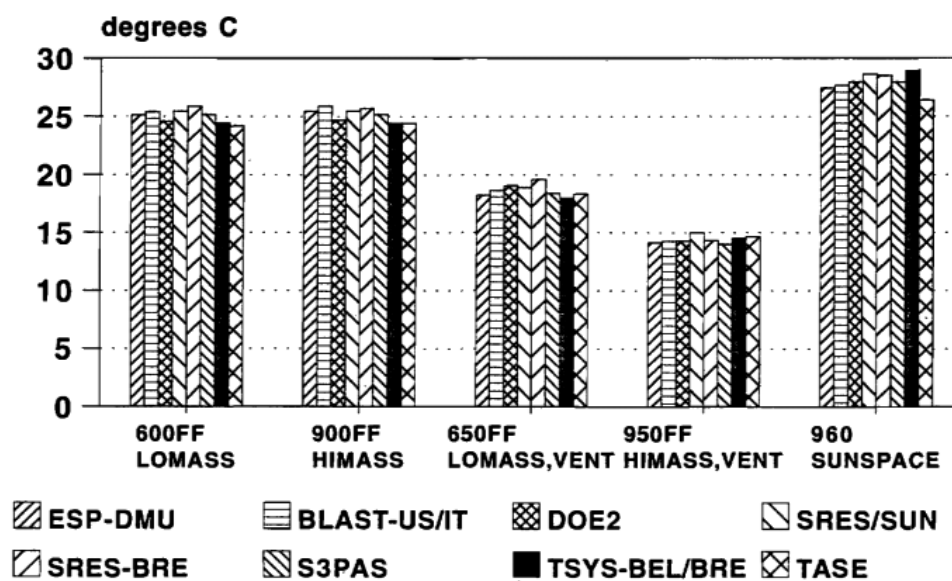


Figura 24 - BESTEST: Casi a temperatura flottante, media della temperatura annuale su base oraria

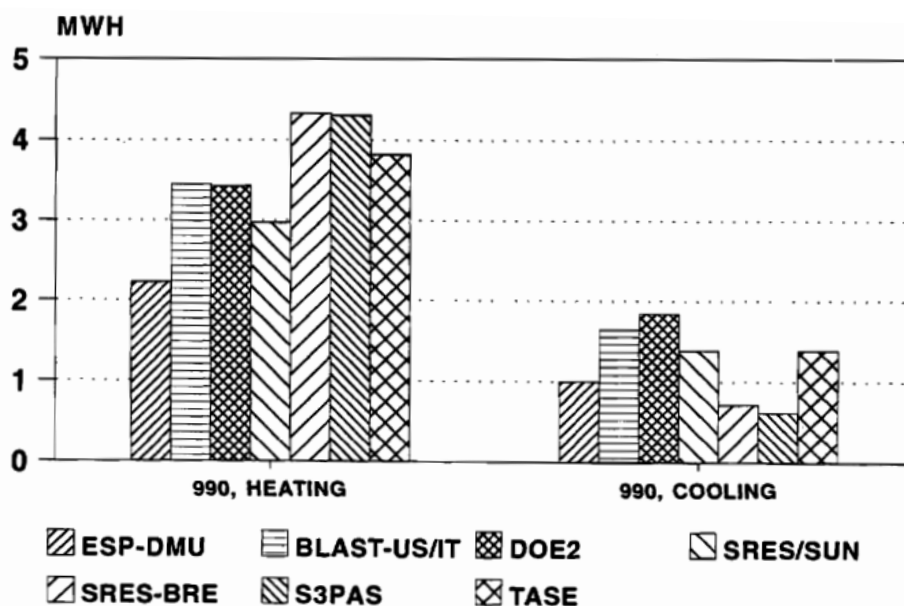


Figura 25 - BESTEST: Casi con accoppiamento verso terra, riscaldamento e raffreddamento annuale

4.3.2 IEA Ground Coupled BESTEST

Il trasferimento di calore verso terra è una importante componente nell'analisi termica degli edifici con un alto rapporto tra superficie, a diretto contatto col terreno, e volume. Tali edifici includono edifici residenziali, insieme a capannoni, centri commerciali, ed altri edifici commerciali. Il trasferimento di calore col terreno è un fenomeno complesso che coinvolge la conduzione termica tridimensionale (*3-D thermal conduction*), la migrazione di umidità, lunghe costanti di tempo, e le proprietà di accumulo termico del suolo. Sulla base delle simulazioni, le dispersioni termiche con una tipica lastra piana (paragonabile al pavimento) addossata al terreno possono variare dal 15% al 45% del fabbisogno energetico per il riscaldamento annuale. Questo risultato dipende da una varietà di parametri, tra cui il clima, le proprietà termiche dell'edificio fuori terra, la presenza di isolamento perimetrale, e il modello di calcolo per il trasferimento di calore geotermico. Le stime dell'ampiezza del disaccordo tra i modelli utilizzati per il calcolo del flusso di calore tra una superficie piana non isolata verso terra sono dal 25% al 60% superiori per i modelli semplificati rispetto ai modelli più complessi, a seconda dei modelli messi a confronto, delle caratteristiche dell'edificio, e del clima. [21]

Precedenti studi di validazione nel campo del trasferimento di calore verso terra

La procedura BESTEST sullo scambio di calore verso il suolo si sono evolute in parallelo con lo sviluppo dei modelli di simulazione. L'iniziale IEA ENVELOPE BESTEST comprende un caso test di trasferimento di calore verso terra (caso 990) che è stato sviluppato quando erano predominanti degli strumenti di simulazione semplificati. Questo caso include un piano seminterrato, ma non definisce tutte le condizioni al contorno che sarebbero necessarie per l'utilizzo dei più attuali modelli dettagliati, ed ha avuto una vasta gamma di divergenza tra i risultati. A causa della sua natura superficiale, questo è stato l'unico caso dell'IEA ENVELOPE BESTEST ad essere escluso dall'ASHRAE Standard 140.

L'HERS BESTEST (vedi [11], [12]), è stato ideato per collaudare strumenti semplificati di uso comune nella modellazione residenziale, e comprende casi test sviluppati per testare modelli semplificati per il trasferimento di calore in configurazioni pavimento/soffitto e con seminterrato. Anche i risultati dell'HERS BESTEST nei casi sopracitati mostrano un ampio intervallo di discordanza tra i modelli semplificati che sono stati analizzati. A causa della natura semplificata delle prove, l'esecuzione dell'HERS BESTEST con gli odierni modelli dettagliati di simulazione richiederebbe l'imposizione di ipotesi non documentate nella relazione tecnica, causando così delle ingenti variazioni tra i risultati.

Diversi produttori di software di analisi energetica hanno sviluppato dei modelli relativamente dettagliati di trasferimento del calore col terreno e li hanno integrati nei programmi di simulazione dell'intero sistema edificio-impianto. Tuttavia, c'è poca o addirittura nessuna informazione riguardante l'esattezza di questi nuovi modelli, o su come si comportano nel confronto tra gli uni e gli altri o rispetto a quelli più semplificati già sviluppati in precedenza. Inoltre, è estremamente difficile e costoso raccogliere dei buoni dati empirici a causa del disturbo sulla terra e sui profili di temperatura causato dalla costruzione edilizia e dal posizionamento dei sensori, dalle lunghe costanti di tempo associate alla grande massa della terra, e dalla variabilità delle condizioni sul campo. Per queste ragioni, il NREL ha collaborato col programma IEA-SHC Task 22 per

sviluppare una metodologia BESTEST per provare e diagnosticare i più avanzati modelli di simulazione del trasferimento del calore verso il suolo. La IEA SHC Task 22 ha studiato vari casi relativamente realistici di scambio termico col terreno e costruzioni con zone semi-interrate. I casi sono stati definiti per verificare i seguenti aspetti della trasmissione del calore tra pavimento/terra e seminterrato:

- edificio / suolo / interazione con l'atmosfera,
- radiazione solare / interazione col suolo,
- variazione dei coefficienti superficiali,
- variazione della geometria,
- effetto dell'isolamento,
- interazione dell'edificio con le condizioni del terreno in profondità,
- possibilità di modellare un seminterrato.

I risultati preliminari della Task 22 per i casi che isolano gli effetti dei modelli per il trasferimento di calore verso il suolo (es. costruzione senza finestre, quasi adiabatica, sopra il livello di campagna) sono mostrati nella Figura 26. I risultati indicano alcune grandi divergenze tra i modelli di analisi dettagliata dello scambio termico verso terra collegati ai software di simulazione energetica dell'intero edificio, anche dopo che fosse stata implementata una importante limitazione sull'algoritmo di analisi in uno dei programmi. Tuttavia, le cause di queste discordanze non potevano essere facilmente determinate, perché i casi test sono stati progettati per essere relativamente realistici, non diagnostici, e non vi era alcun standard di verità matematica o empirica. Tali incongruenze possono essere causate da legittime differenze nei metodi di modellazione, errori di input, o errori negli algoritmi stessi, o nell'utilizzo di un modello al di fuori del range previsto.

Sulla base di questi contrasti non risolti, i ricercatori hanno concluso che prima di procedere ulteriormente con il compito della Task 22, o con altri casi di test realistici, doveva essere sviluppata una diagnostica approfondita per risolvere o capire meglio le cause delle differenze riscontrate in questo lavoro.

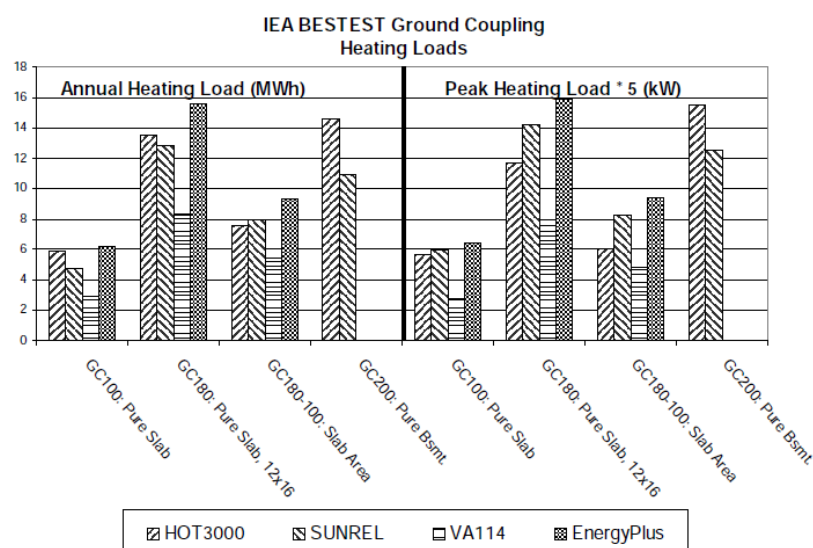


Figura 26 - GC BESTEST: risultati raggiunti dall'IEA SHC Task 22 (Fonte: [21])

In parallelo alla Task 22, l'ASHRAE ha pubblicato una raccolta di soluzioni analitiche che includeva una soluzione 3D in regime stazionario per i fenomeni di trasmissione del calore tra una superficie piana (a geometria rettangolare) e il terreno a cui era addossata, originariamente sviluppato da Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia. Questo ha generato l'idea di sviluppare una suite di test a partire dalla soluzione analitica CSIRO, che sarebbe poi progredita passo passo verso condizioni al contorno e ipotesi più realistiche. Inoltre, se questi casi test fossero stati svolti con modelli numerici specifici per casi tridimensionali e si fosse verificata la convergenza, ed una buona congruenza tra i risultati, tali modelli numerici potrebbero costituire una soluzione "quasi analitica".

4.3.2.1 Definizione dei casi test

Un insieme di casi di verifica analitica e diagnostica è stato sviluppato per l'uso nella validazione dei modelli di trasferimento del calore nei sistemi con solaio accoppiato al terreno. Questi casi test sono stati sviluppati dall'IEA-SHC Task 34 in collaborazione con l'ECBCS Allegato 43 (IEA 34/43), i quali hanno prodotto una relazione tecnica nota come NREL/TP-550-43388 alla quale faremo riferimento nel seguito di questa sezione. La logica per i casi test può essere riassunta come segue:

- Identificare o sviluppare delle soluzioni analitiche esatte, che possano essere utilizzate come standard di verità matematica per le prove sui modelli numerici dettagliati, utilizzando i parametri e le ipotesi semplificative della soluzione analitica.
- Applicare un processo di soluzione numerica, che dimostri la convergenza nei domini di spazio e tempo per i casi test con soluzione analitica e per la risoluzione di casi di test supplementari in cui sono applicati i modelli numerici.
- Una volta validato con le soluzioni analitiche, usare i modelli numerici per sviluppare i risultati di riferimento per casi di test che procedono verso condizioni più realistiche (meno idealizzate), di cui non si hanno soluzioni analitiche esatte.
- Controllare i modelli numerici con attenzione, confrontando i risultati gli uni agli altri, mentre si sviluppano i casi più realistici ed apportare le eventuali correzioni necessarie.
- Si deve riscontrare una buona congruenza 1) per la serie di modelli numerici rispetto alla soluzione analitica, 2) tra i risultati degli uni e degli altri metodi numerici per i vari casi test successivi. Infine si deve verificare l'intera procedura usando le soluzioni numeriche come una sorta di seconda verità matematica basata sulla gamma di disaccordo tra i loro risultati.
- Utilizzare i risultati già verificati del modello numerico come riferimento per le prove di altri modelli che sono stati incorporati nei programmi di simulazione dell'intero sistema edificio-impianto.

Questo approccio rappresenta un importante progresso metodologico di estensione del metodo di verifica analitica, in quanto supera quei vincoli inerenti alle classiche soluzioni analitiche. Esso consente di sviluppare una secondaria verità matematica nella forma di una serie di dettagliati modelli numerici stand-alone (soluzioni quasi analitiche). Una volta verificato con tutte le classiche soluzioni analitiche disponibili, e confrontato con gli altri modelli numerici per i casi che non hanno soluzioni analitiche, l'insieme dei modelli numerici verificati può essere utilizzato per testare altri modelli, come quelli integrati nei software di analisi e simulazione dell'intero sistema

edificio-impianto. Questo permette una capacità diagnostica di gran lunga maggiore rispetto al metodo puramente comparativo, e permette l'imposizione di condizioni al contorno più realistiche rispetto ai casi test dove sono disponibili soluzioni puramente analitiche. Una descrizione più dettagliata della nuova metodologia è disponibile nella seconda parte della relazione tecnica completa (sezione 2.5.1).

Come riassunto in Tabella 14 e Tabella 15, diciassette casi test sono stati sviluppati per utilizzare i risultati – ricavati dai verificati modelli di analisi dettagliata del trasferimento del calore in mezzi direttamente accoppiati col terreno – come una secondaria verità matematica nel confronto con quelli derivati dai modelli meno dettagliati tipicamente inclusi nei software di simulazione energetica degli edifici. I nuovi casi test adottano una pavimentazione idealizzata, non isolata, posta al livello del piano di campagna come si vede dalla Figura 30 e precedenti. Questa configurazione semplificata è richiesta dalla soluzione analitica del caso GC10a (soluzione analitica CISRO), e appare idonea per lo sviluppo di robusti casi di prova per l'analisi di strutture addossate al terreno, ed è compatibile con tutti i programmi testati nel progetto condotto dall'IEA 34/43, inoltre ha facilitato lo sviluppo di risultati accurati minimizzando la possibilità di introdurre errori nei dati di input.

Variazioni parametriche rispetto al caso base in regime stazionario (caso GC30b) comprendono la periodica variazione della temperatura superficiale del terreno, l'area della lastra / pavimento, la profondità della temperatura profonda del terreno, conducibilità termica della lastra e della terra, e i coefficienti di scambio termico superficiale della lastra (coefficiente interno) e della terra (coefficiente esterno). I casi test usano condizioni al contorno sia in regime stazionario che armonico, applicate con una serie di dati meteorologici annuali costruiti artificialmente, insieme ad una struttura edilizia fuori terra adiabatica così da poter isolare gli effetti dello scambio termico col terreno. Ciò è comodo per testare i programmi che non riescono facilmente a separare, nei loro output, i valori legati alle perdite per conduzione associati alla superficie accoppiata col suolo. Valori di output diversi – includendo i risultati in regime stazionario, totali annui (e di picco) in regime periodico – vengono confrontati e usati in combinazione con un metodo diagnostico formale per determinare gli algoritmi responsabili delle differenti previsioni.

I casi di test sono suddivisi in tre categorie:

- serie “a” - sono i casi per i programmi numerici più dettagliati e complessi (es. modelli numerici 3D che sono stati sviluppati per l'analisi energetica dell'intero edificio, come TRNSYS e SUNREL-GC, e modelli similari sviluppati utilizzando FLUENT e MATLAB); l'intento di questi casi è quello di dimostrare che i modelli numerici sono stati correttamente applicati.
- serie “b” - sono i casi per modelli più vincolati utilizzati nei software di simulazione dell'intero sistema edificio-impianto (es. EnergyPlus ed i metodi di calcolo della ISO 13370¹⁰), permettendo in questo modo il confronto coi modelli più dettagliati e/o flessibili.

¹⁰ Adapted ISO-13370 European standard ground heat transfer calculation method.

- serie “c” - sono i casi dove si applicano le condizioni al contorno compatibili con BASESIMP, consentendo così il confronto di BASESIMP con gli altri modelli.

Un caso di verifica preliminare (caso GC10a) è incluso per confrontare i dettagliati modelli numerici tridimensionali con la soluzione analitica 3D in regime stazionario, che incorpora le condizioni al contorno che possono essere difficili da modellare nei tipici software di analisi dell'intero sistema edificio-impianto. Il caso GC10a fornisce un risultato analitico di riferimento per verificare la correttezza complessiva e la corretta applicazione.

Le specifiche di prova sono strutturate in modo tale che la serie "b", che è probabile che sia la più attuabile per molti più software rispetto alle serie "a" e "c", viene presentata prima delle altre. I casi delle serie "a" e "c", che sono derivati dai casi della serie "b", sono presentati nelle sezioni successive. Se il programma che viene testato può eseguire i casi di serie “a”, nel modo in cui sono descritti, si deve eseguire la serie "a" prima di procedere con uno qualsiasi degli altri casi test.

Case	Description / test	Dynamic	Slab Dimen. (m x m)	h,int (W / m ² K)	h,ext (W / m ² K)	Gound Depth (m)	Far-Field Bound ^B	Cond. (W / m K)	Comments
Analytical Verification Tests									
GC10a	Analitical Base Case Rectangular floor slab. Steady-state 3D conduction	steady-state	12 x 12	const. T ^A	const. T ^A	infinite	infinite	1,9	Analytical verification of detailed numerical-methods models, including set up of node meshing and boundary conditions. <i>Boundary Conditions:</i> constant temperature floor (Ti) and exterior ground (To) surfaces; linear dT across slab perimeter surface boundary <i>Other Inputs:</i> 24 cm perimeter boundary width, To = 10°C, Ti = 30°C, suppress all other modes of heat transfer.
Comparative Tests									
GC30a	Comparative Base Case for "a"-series	steady-state	12 x 12	const. T ^A	const. T ^A	30	20	1,9	<i>Boundary Conditions:</i> slab perimeter surface is adiabatic GC30a-GC10a tests adiabatic versus linear dT slab perimeter surface b.c.
GC30b	Comparative Base Case for "b"-series	steady-state	12 x 12	100	100	15	15	1,9	Most robust version of GC30a possible for EnergyPlus and SUNREL-GC Inputs: To,a = 10°C, Ti,a = 30°C. GC30b-GC30a tests h = 100 versus direct T ^C
GC40a	Harmonic Variation	harmonic	12 x 12	direct T ^A	direct T ^A	30	20	1,9	Annual "harmonic" variation of To or To,a: mean=10°C, low=2°C, high=18 °C
GC40b	Harmonic Variation	harmonic	12 x 12	100	100	15	15	1,9	GC40 tests phase shift of varying q versus varying To GC40-GC30 tests annual mean q for varying versus steady To
GC45b	Aspect Ratio (AR)	harmonic	36 x 4	100	100	15	15	1,9	GC45b-GC40b tests aspect ratio, high perimeter heat transfer fraction
GC50b	Large Slab	harmonic	80 x 80	100	100	15	15	1,9	GC50b-GC40b tests large slab, high core heat transfer fraction
GC55b	Shallow Deep Ground Temp.	harmonic	12 x 12	100	100	2	15	1,9	GC55b-GC40b tests shallow deep ground temperature, high core heat transfer fraction
GC60b	h,int	steady-state	12 x 12	7,95	100	15	15	1,9	GC60b-GC30b tests h,int and resulting floor surface Temp. distribution
GC65b	h,int and h,ext	steady-state	12 x 12	7,95	11,95	15	15	1,9	GC65b-GC60b tests h,ext and resulting ground surface Temp. distribution GC65b-GC30b tests combined effects of h,int and h,ext
GC70b	Harmonic h,int and h,ext	harmonic	12 x 12	7,95	11,95	15	15	1,9	GC70b-GC40b tests combined effects of h,int and h,ext in dynamic context GC70b-GC65b tests annual mean q for varying versus steady To
GC80b	Ground Conductivity	harmonic	12 x 12	100	100	15	15	1,9	GC80b-GC40b tests ground conductivity
Abbreviations:				"direct T" = direct input temperature (varies hourly)				"Temp." = temperature	
"b.c." = boundary condition				"dT" = temperature variation				"Ti" = slab interior surface temperature	
"Cond." = slab & soil conductivity				"h,ext" = exterior surface convective coefficient				"Ti,a" = zone air temperature	
"const T" = direct input constant temperature				"h,int" = interior surface convective coefficient				"To" = exterior ground surface temperature	
"Dimen." = dimension				"q" = heat flow through floor slab				"To,a" = outdoor dry-bulb temperature	
Notes:									
^A For models that require air temperature inputs (i.e., that do not allow direct input of surface temperatures), convective surface coefficients are effectively infinite.									
^B Distance from slab edge.									
^C GC30c-GC30a also includes minor difference in amount of soil modeled.									

Tabella 14 - GC BESTEST: descrizione casi test serie, “a” e “b” (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

Case	Description / test	Dynamic	Slab Dimen. (m x m)	h,int (W / m ² K)	h,ext (W / m ² K)	Gound Depth (m)	Far-Field Bound ^B	Cond. (W / m K)	Comments
GC30c	Comparative Base Case for "c"-series	steady-state	12 x 12	7,95	const. T ^A	15	8	1,9	Most robust version of GC30 that can be done by BASESIMP <i>Inputs:</i> To = 10°C, Ti,a = 30°C. GC30c-GC30a tests reduced h,int = versus direct TC
GC40c	Harmonic Variation	harmonic	12 x 12	7,95	direct T ^A	15	8	1,9	GC40c tests phase shift of varying q versus varying To GC40c-GC30c tests annual mean q for varying versus steady To
GC45c	Aspect Ratio (AR)	harmonic	36 x 4	7,95	direct T ^A	15	8	1,9	GC45c-GC40c tests aspect ratio, high perimeter heat transfer fraction
GC55c	Shallow Deep Ground Temp.	harmonic	12 x 12	7,95	direct T ^A	5	8	1,9	GC55c-GC40c tests shallow deep ground temperature, high core heat transfer fraction
GC80c	Ground Conductivity	harmonic	12 x 12	7,95	direct T ^A	15	8	0,85	GC80c-GC40c tests ground conductivity
Abbreviations:					"direct T" = direct input temperature (varies hourly)			"Temp." = temperature	
"Cond." = slab & soil conductivity					"h,ext" = exterior surface convective coefficient			"Ti,a" = zone air temperature	
"const T" = direct input constant temperature					"h,int" = interior surface convective coefficient			"To" = exterior ground surface temperature	
"Dimen." = dimension					"q" = heat flow through floor slab				
Notes:									
^A For models that require air temperature inputs (which do not allow direct input of surface temperatures), convective surface coefficients are effectively infinite.									
^B Distance from slab edge.									
^C GC30c-GC30a also includes minor difference in amount of soil modeled.									

Tabella 15 - GC BESTEST: descrizione casi test, serie "c" (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

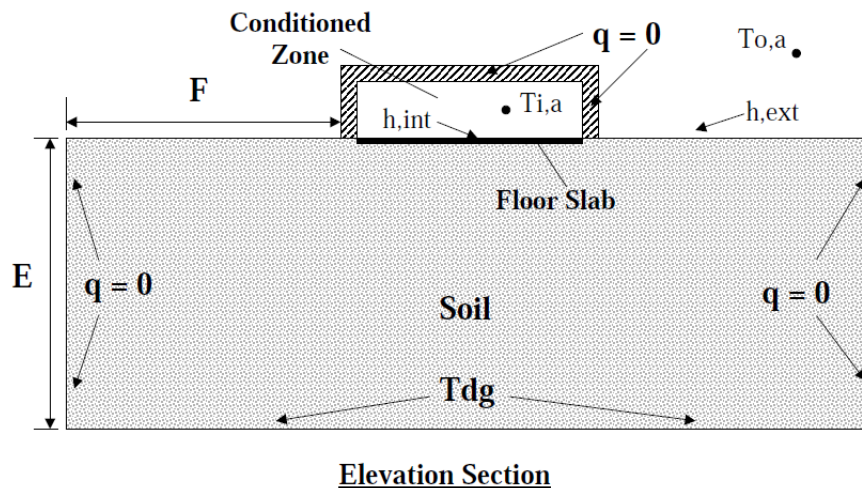
Geometria serie b

Figura 27 - GC BESTEST: geometria con condizioni al contorno, caso GC30b
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

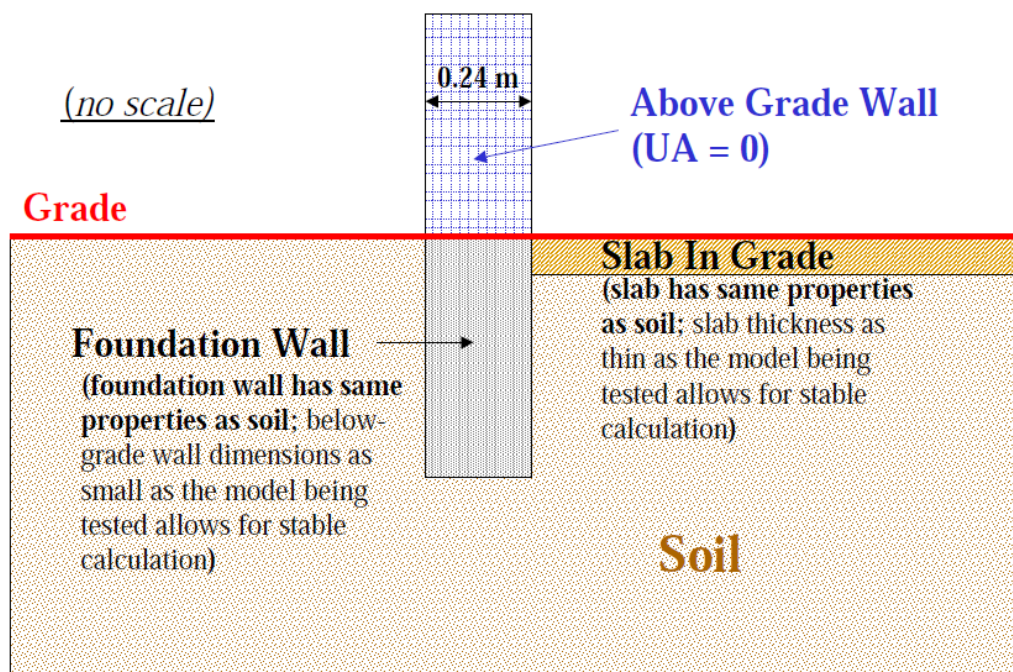
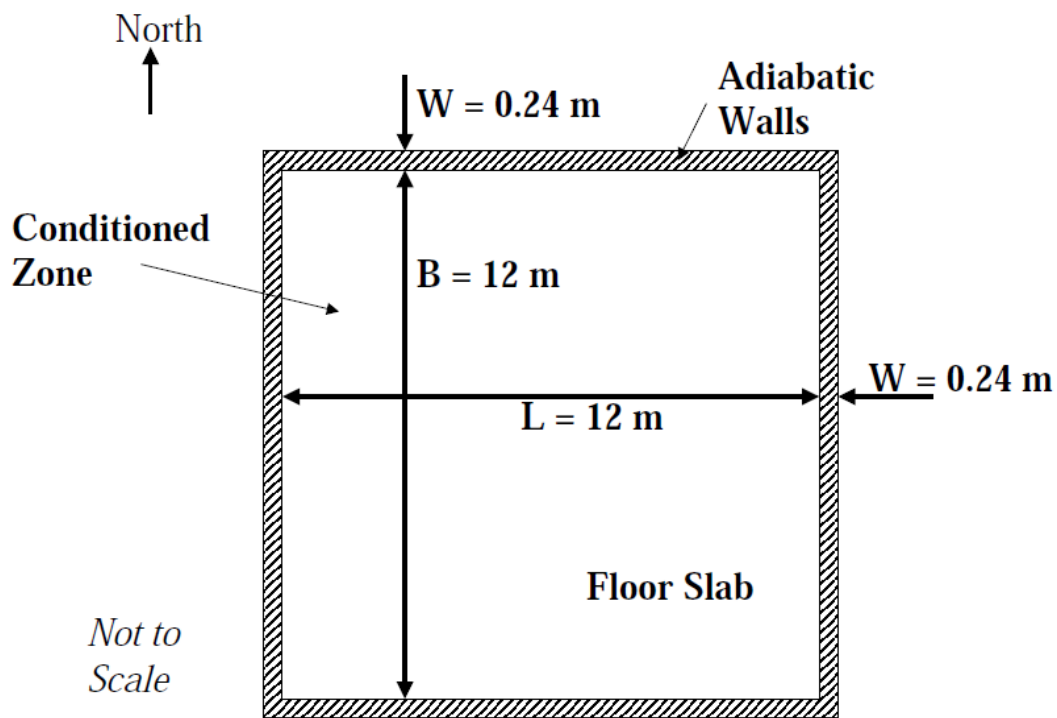
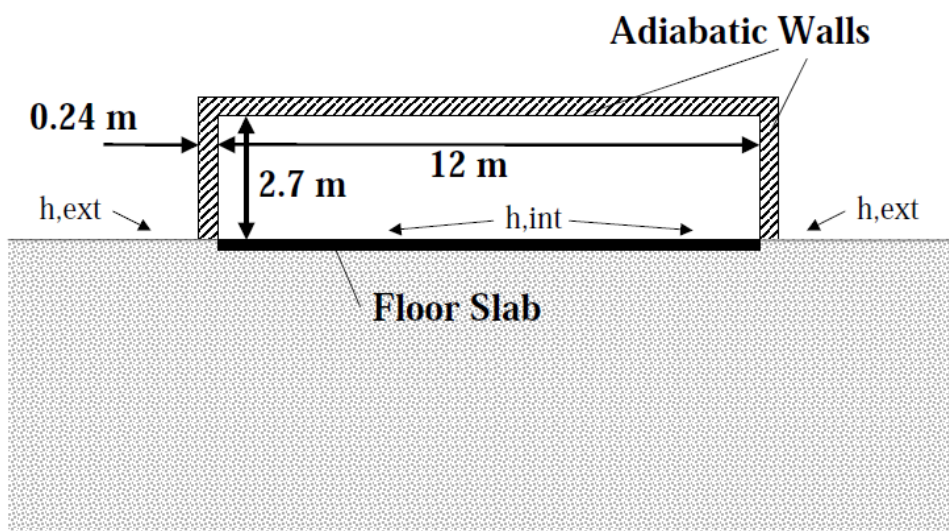


Figura 28 - GC BESTEST: dettagli sulla geometria al bordo, caso GC30b
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

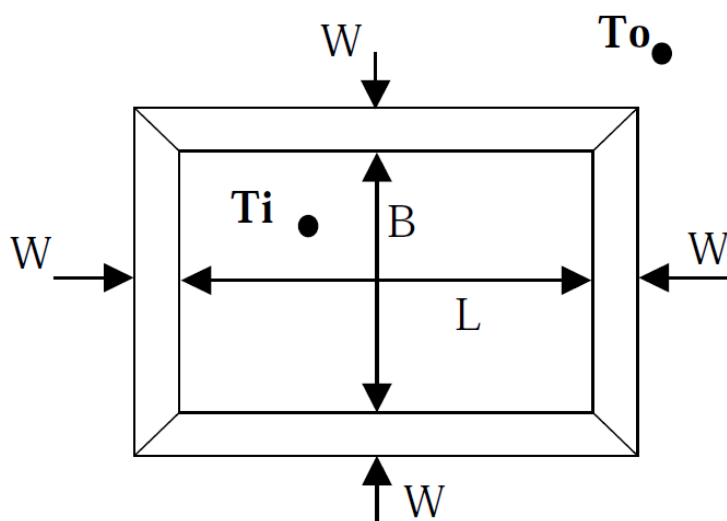


Plan View



Elevation Section

Figura 29 - GC BESTEST: geometria con specifiche dimensionali, caso GC30b
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

Geometria serie a**Figura 30 - GC BESTEST: geometria caso analitico, GC10a (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)**

Lunghezza (L)	12 m
Larghezza (B)	12 m
Dimensione bordi esterni (W)	0,24 m
Temp. Superficiale interna (pavimento)	30 °C
Temp. Superficiale esterna (terreno)	10 °C
Conducibilità termica del suolo e della lastra	1,9 W / (m K)

Tabella 16 - GC BESTEST: geometria caso analitico, GC10a (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

Devono essere applicate le seguenti ipotesi e condizioni al contorno:

- Temperatura interna della superficie del pavimento (T_i) costante e uguale ovunque.
- Temperatura esterna del terreno (T_0) costante e uguale ovunque.
- È imposta una variazione lineare tra T_i e T_0 lungo la superficie perimetrale di larghezza W solo sulla superficie rivolta verso terra (questo consente una discontinuità sul contorno interno/esterno).
- Geometria semi-infinita: la superficie del suolo si estende verso l'esterno infinitamente in tutte le direzioni orizzontali a partire dal bordo perimetrale definito in Figura 30, e il terreno si estende infinitamente verso il basso a partire da tutti i punti della superficie orizzontale (incluso le superfici di Figura 30).
- Condizioni al contorno alla profondità infinita del suolo = T_0 .
- Conducibilità termica del suolo e della lastra piana uguali.
- Non c'è scambio radiativo.

4.3.2.2 Risultati di riferimento

Prove sperimentali con i nuovi casi IEA BESTEST (Ground Coupled cases) sono stati condotti con un certo numero di dettagliati modelli numerici¹¹, rappresentativi dell'attuale stato dell'arte tra i software di simulazione energetica dell'intero edificio-impianto, che contenevano una serie di modelli (per la rappresentazione di situazioni con accoppiamento col terreno) provenienti da tutto il mondo. Il processo seguito si può considerare iterativo, ovvero le simulazioni condotte hanno portato al perfezionamento dei casi test, ed i risultati hanno portato al miglioramento dei modelli stessi.

L'accordo tra i risultati delle simulazioni è migliorato ad ogni iterazione. I miglioramenti sui programmi di simulazione sono evidenti quando si confrontano il primo set di risultati (vedi Figura 33 per i casi in regime stazionario, Figura 31 per i casi in regime dinamico) con quelli finali (vedi Figura 34 per i casi in regime stazionario, Figura 32 per i casi in regime dinamico). (In queste figure i modelli numerici verificati sono evidenziati dallo sfondo blu, mentre per il risultato analitico (caso GC10a) si è adottato lo sfondo magenta.)

I partecipanti erano tenuti a fornire miglioramenti ai programmi di simulazione o agli input sulla base di solidi principi matematici e/o fisici, e applicarli in modo coerente in tutte le prove. Tutti i miglioramenti che sono stati necessari sono stati documentati e giustificati nei *modeler report* inclusi nella trattazione completa.

Questi risultati indicano che inizialmente vi era un 9% - 55% di disaccordo per il fabbisogno energetico simulato, con una considerevole dispersione tra i vari programmi. Col termine disaccordo si è indicata la differenza tra i risultati di massimi e minimi per ogni caso, diviso la media dei risultati per ciascun caso ($(\text{max-min}) / \text{media}$). Questi risultati includono due stime che si sono adottate prima delle correzioni effettuate durante i lavori dell'IEA-SHC Task 22 (documentati nella sezione 2.4 del report completo), che non erano stati precedentemente pubblicati e pertanto non compaiono in Figura 26, si vedano i risultati per il caso GC60b in Figura 33, e quelli per il caso GC70b in Figura 31. Dopo la correzione degli errori dei software utilizzando la diagnostica precisata al prossimo paragrafo - dove sono state trovate 24 discordanze tra i programmi, che hanno portato a 19 correzioni finora - i rimanenti disaccordi sono tra l'1% e il 24% con ridotta dispersione tra i risultati. Questo può essere considerato un ragionevole range di discordanza, data la complessità del problema da modellare, anche se alcune più marcate differenze evidenziate in questo lavoro potrebbero essere affrontate in un progetto successivo. La congruenza è migliorata anche tra i modelli numerici dettagliati (risultati mostrati con sfondo blu), dove le divergenze iniziali che raggiungevano il 12% sono state ridotte a 0% - 4% per i modelli verificati in questo progetto. La Tabella 17 riassume tali risultati dividendoli per tipo di dati osservati e separandoli per i modelli numerici verificati ed i software di simulazione; la Tabella 18 invece riporta gli errori individuati ed eventualmente corretti durante questo progetto.

¹¹ Modelli numerici verificati: FLUENT 6.0.20, MATLAB 7.0.4.365 (R14), TRNSYS 16.1; Programmi di simulazione: BASECALC V1.0e, EnergyPlus 2.0.0.025, ESP-r / BASESIMP, GHT, SUNREL-GC 1.14.01, VA114 2.20/ISO-13370. (Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

Output	Verified Numerical Models	Other simulations
Case GC10a, Steady-State Floor Conduction (W or Wh/h)	0.3%	0.5% (GHT only)
Steady-State Floor Conduction, Other Cases (W or Wh/h)	0.7% – 4.2%	10% – 16%
Annual Steady-Periodic Floor Conduction (kWh/y)	0.9%–3.5%	7%–24%
Steady-Periodic Annual Peak Hour Floor Conduction (W or Wh/h)	1.0%–4.2%	2%–18%

Tabella 17 - GC BESTEST: intervalli di discordanza tra i risultati finali
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

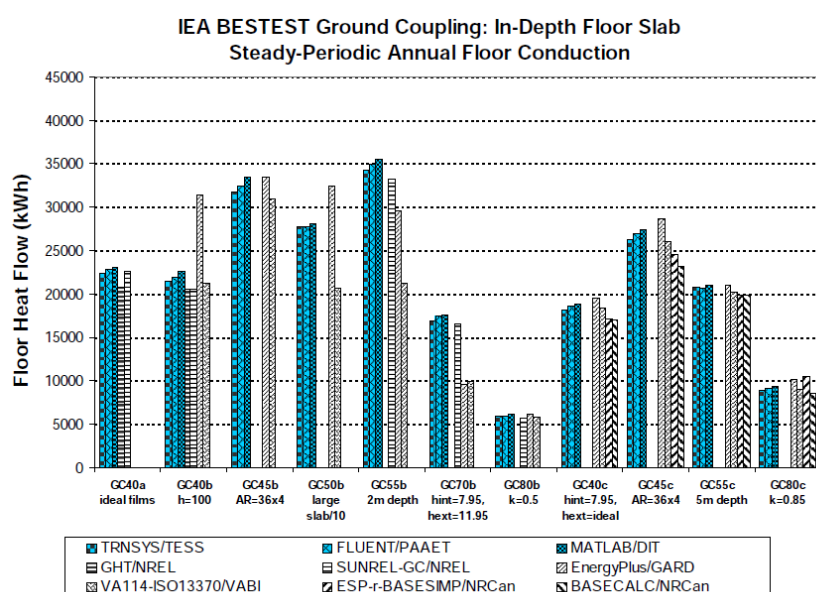


Figura 31 - GC BESTEST: conduzione termica in regime periodico, prima delle correzioni
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

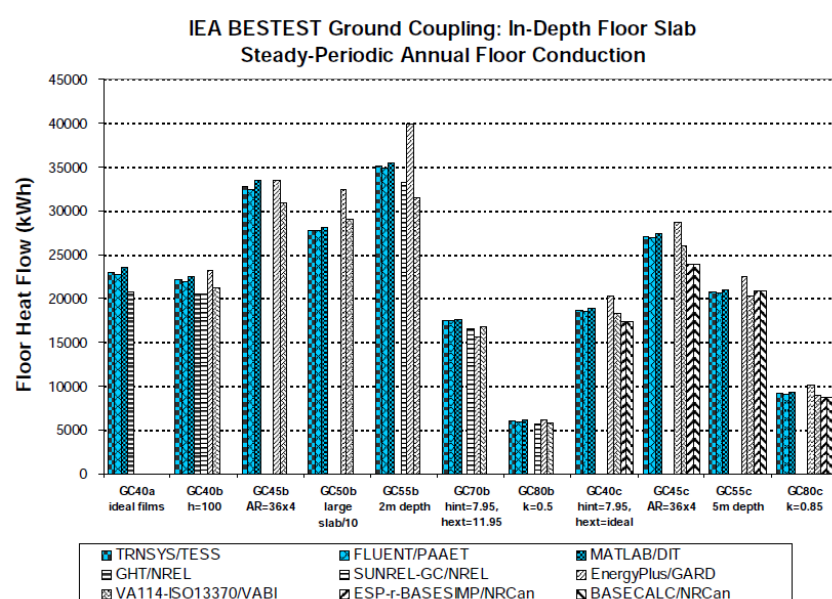


Figura 32 - GC BESTEST: conduzione termica in regime periodico, dopo le correzioni
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

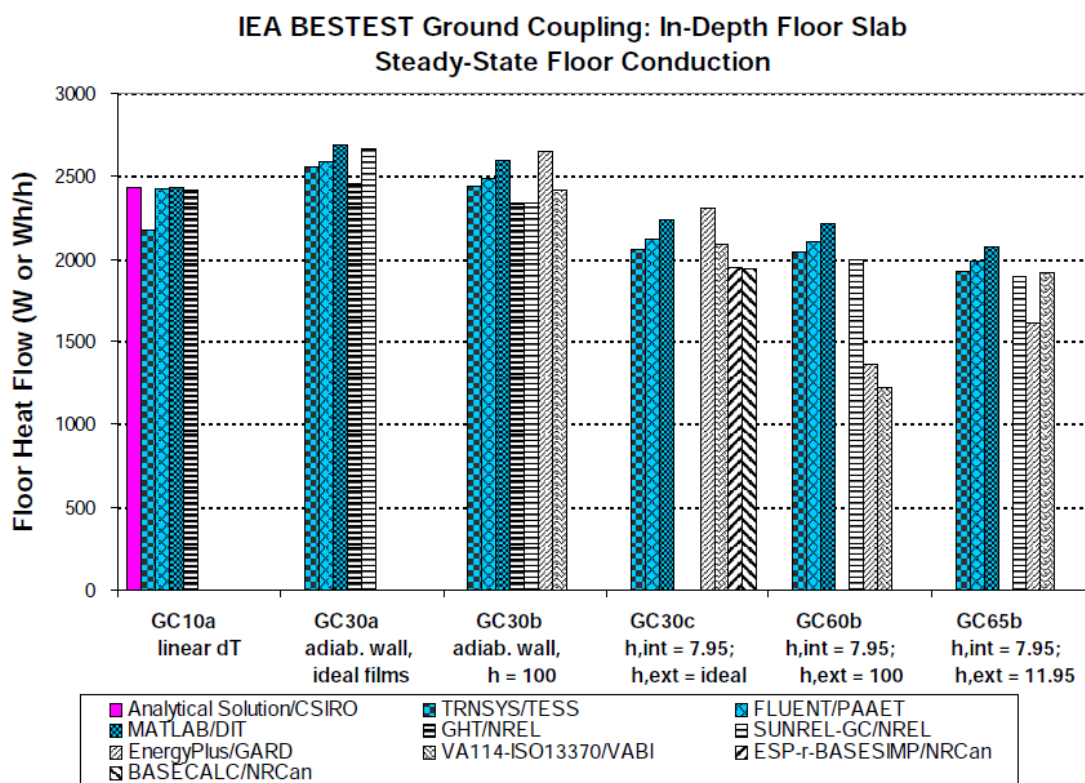


Figura 33 - GC BESTEST: conduzione termica in regime stazionario, prima delle correzioni
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

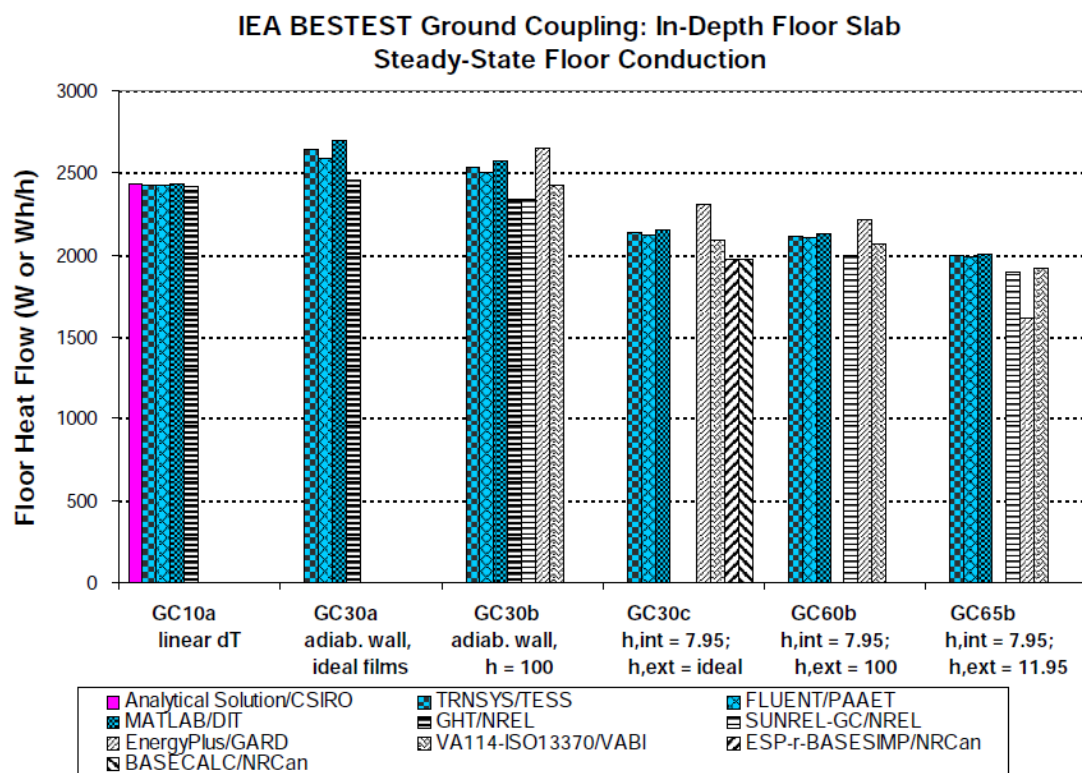


Figura 34 - GC BESTEST: conduzione termica in regime stazionario, dopo le correzioni
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

4.3.2.3 Bugs riscontrati nei software analizzati

Model ^A	Error Description ^A	% Floor Conduction Effect or Disagreement ^{A,B}	Resolution
BASECALC	Input error	1% – 5% (“c” series cases)	Fixed
BASECALC	Perimeter heat flow disagreement	9% (GC45c)	No change ^F
BASESIMP/ESP-r	Test configurations fall outside range of parameter variations allowed by correlations	21% (GC80c) 1% – 4% (other “c” cases)	Fixed
DIT/MATLAB	Surface convection modeling by DIT	1% – 4% (GC30b, GC30c, GC60b, GC65b)	Fixed
DIT/MATLAB	Slabedge loss modeling by DIT	0,3% (GC30a)	Fixed
DIT/MATLAB	Near-surface temperature reporting by DIT	No effecton floor conduction	Fixed
EnergyPlus	User cannot input floor slab interior surface coefficient	270% (Task22 Case GC180)	Fixed
EnergyPlus	User cannot define deep ground boundary temperature (Tdg)	No effecton test results (Tdg = annual average ODB)	Fixed
EnergyPlus	User cannot define groundsurface h,ext (h,extcalculatedfrom wind speed)	Not isolated by participant, probably minor effect	Fixed
EnergyPlus	Unclear documentation regarding inputs for ground depth and far-field dimension	4%, 7% (GC40c, GC70c) Simulation crash (GC55b)	Fixed
EnergyPlus	Input error related to manual interface of Slab subprogram and main EnergyPlus	35% – 40% (GC40)	Fixed ^C
EnergyPlus	User cannot define ground depth	35% (GC55b v. GC55)	Fixed
EnergyPlus	Disagreement for variation of ground surface heat transfer coefficient	18% (GC65b)	Authors notified
EnergyPlus	Disagreement for variation of ground depth	15% (GC55b)	Authors notified
GHT/SUNREL-GC	Integration of GHT model with SUNREL-GC	5% (GC30b v. GC30) 8% (GC40b v. GC40)	Fixed
GHT/SUNREL-GC	Disagreements versus verified numerical models	7% – 10% (“a” series cases) 5% – 8% (“b” series cases)	Authors notified
PAAET/FLUENT	PAAET modeling error	0,7% (GC30b)	Fixed ^D
PAAET/FLUENT	Two output reporting issues by FLUENT	No effect on overall floor conduction	Fixed ^D
TRNSYS	First nodding algorithm improvement	10% (GC10)	Fixed
TRNSYS	Second nodding algorithm improvement	2% (GC10a)	Fixed
TRNSYS	Third nodding algorithm improvement	0,4% (GC10a) 1% - 2% (GC30a–GC80c)	Fixed
VA114/ISO-13370	One-dimensional conduction modeling	100%, 70% (preliminary Task22 cases GC100 and GC180)	Fixed ^E
VA114/ISO-13370	Insensitive to variation of ground depth	29%, 49% (GC50b, GC55b)	Fixed
VA114/ISO-13370	Late time ofoccurrence for peak heat flow	Peak delayed 700, 300 – 500 hours GC55b other cases	No change ^F

^A Acronyms and abbreviations: DIT = Dublin Institute of Technology; GARD = GARD Analytics, h,int = interior surface heat transfer coefficient; h,ext = exterior surface heat transfer coefficient; ISO 13370 = European Standard EN ISO 13370: Thermal performance of buildings – Heat transfer via the ground – Calculation methods; ODB = Outdoor Dry-Bulb temperature; PAAET = Public Authority for Applied Education and Training; v. = versus.

^B Effects are for floor conduction unless otherwise noted; specific cases relevant to the described effects are included in parentheses. For disagreements listed as fixed, listed percentage values are the effect of the change for new results versus previous results for a given model; otherwise, percentage values are remaining disagreement versus verified numerical models.

^C Program developers later included example floor model inputs to main EnergyPlus as output from the Slab subprogram; however, better automation of interface between the EnergyPlus subprogram and main engine is recommended.

^D Fixed in later version of FLUENT before this testing.

^E Adapted ISO-13370 European standard ground heat transfer calculation method.

^F Software developer indicates this disagreement is acceptable for this model.

Tabella 18 - GC BESTEST: riassunto sui problemi individuati con la diagnostica BESTEST
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

4.3.2.4 Diagrammi diagnostici

Prima di procedere con l'esposizione dei diagrammi diagnostici, si vuol ora sottolineare alcuni aspetti fondamentali correlati al loro utilizzo.

I diagrammi forniscono un'indicazione sulla probabile causa di eventuali anomalie tra i risultati, in quanto ogni caso test è mirato a stressare algoritmi di calcolo specifici. In particolare esistono due metodi contrapposti per l'applicazione della logica diagnostica schematizzata in tali diagrammi di flusso. Il più potente, ma che richiede molto tempo, è quello di eseguire tutti i test e successivamente analizzare i risultati seguendo la logica diagnostica indicata nei diagrammi. Il modo che richiede meno tempo è quello di lanciare i test in sequenza, seguendo le indicazioni dei diagrammi, come descritto nel seguito.

I test indicati, ad esempio, con "GC45b-GC40" suggeriscono il confronto (di sensibilità) tra i risultati del caso GC45b con quelli del caso GC40b già eseguito precedentemente. In particolare si deve porre particolare attenzione all'intensità della differenza tra i due risultati (*delta results*) ed il loro segno.

Se un software mostra delle difformità con i risultati di riferimento, in primo luogo si consiglia di controllare la correttezza di tutti i dati di input. Qualora non si siano individuati errori nei dati di input, si prosegue la ricerca del problema nel codice sorgente del programma, se si trova un errore allora si provvede alla sua correzione e alla ripetizione del caso test.

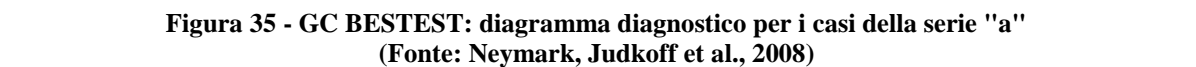
Se in un'ottica ingegneristica, il disaccordo è causato da una differenza ragionevole tra i risultati degli algoritmi testati e quelli di riferimento, allora si può proseguire con il successivo caso di prova.

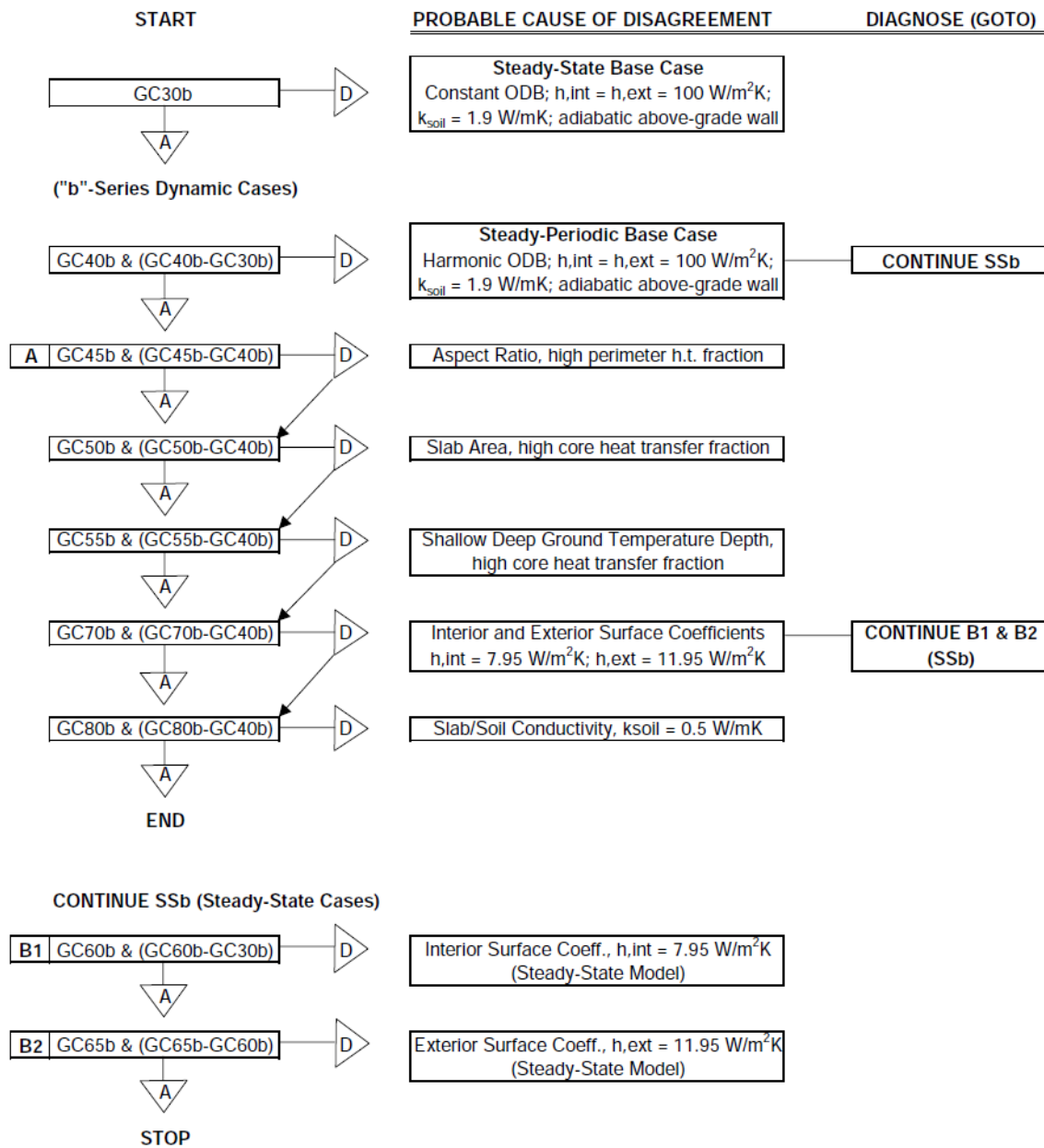
I percorsi alternativi (es. doppia freccia come nel caso GC55b) indicano la possibilità di passare oltre anche se sono state scoperte alcune divergenze nel caso precedente. Ad esempio, nel caso GC55b, l'incapacità di modellare la temperatura con basse profondità del terreno non pregiudica necessariamente l'utilità o verificabilità del software per la modellazione di scenari con profondità della terra più reali. Così, il diagramma di flusso ha una freccia di collegamento in più tra il caso GC55b e il caso GC70b, che indica che si può procedere a prescindere dai risultati del caso GC55b. Qualora i casi siano collegati da una sola freccia, è necessario un risultato soddisfacente per procedere col caso successivo. Ad esempio, nel caso GC60b, l'incapacità di modellare l'effetto realistico del coefficiente della superficie interna rende difficile procedere col caso GC65b poiché il disaccordo sarebbe ristabilito.

Nelle operazioni di confronto tra i risultati del software in esame con quelli di riferimento, risultano molto utili i file allegati al report completo (in formato excel) in quanto prevedendo l'inserimento dei nuovi dati, confrontandoli automaticamente in grafici e tabelle con quelli di riferimento

Durante il test con la serie "a" dei modelli numerici dettagliati, l'esperienza da prove sul campo consiglia di cominciare inizialmente dal controllo dei risultati di ogni singolo caso prima di passare a ulteriori casi. In particolare, prima si esegue solamente il caso GC10a e si verificano i risultati rispetto alla soluzione analitica. Se il risultato è soddisfacente, si può passare direttamente al caso GC30a, e analogamente per i casi GC40a, GC30b, GC40b, in quanto ognuno affronta un cambiamento fondamentale nelle condizioni al contorno per la modellazione in regime stazionario

Esempio pratico

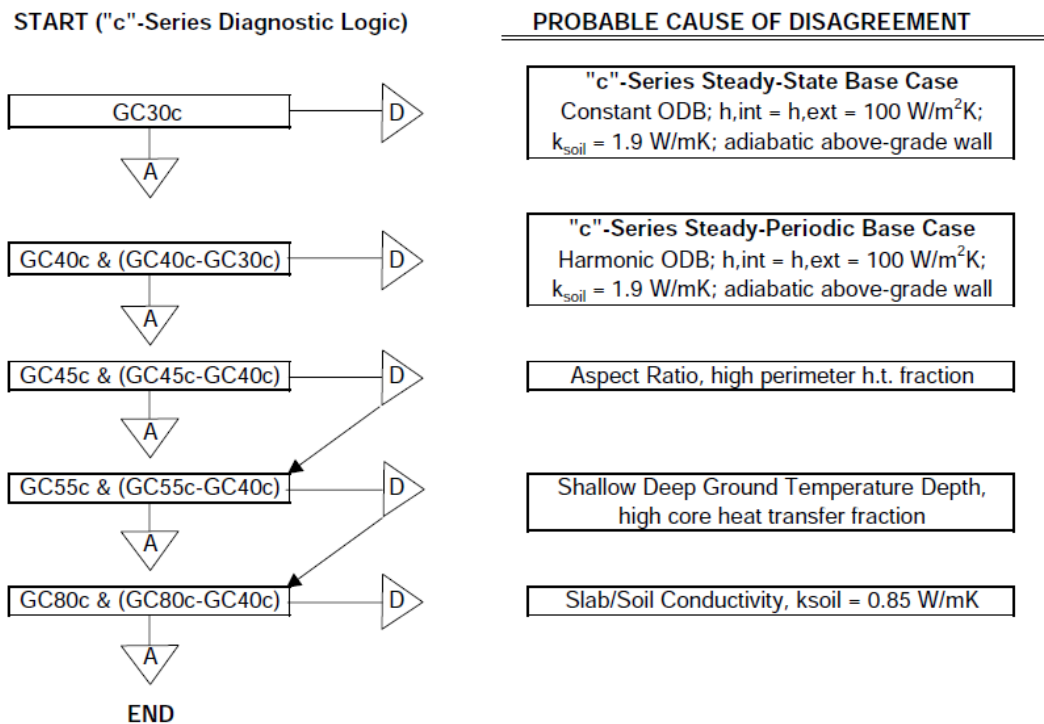




ABBREVIATIONS

A = Agree; D = Disagree. For these test cases, agreement/disagreement is determined relative to quasi-analytical solution results, including listed sensitivity cases.

Figura 36 - GC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi della serie "b"
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

**ABBREVIATIONS**

A = Agree; D = Disagree. For these test cases, agreement/disagreement is determined relative to quasi-analytical solution results, including listed sensitivity cases.

Figura 37 - GC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi della serie "c"
(Fonte: Neymark, Judkoff et al., 2008)

4.3.3 HVAC BESTEST: Cases E100-E200

Nel progetto IEA-SHC Task 22 Subtask C, la metodologia di test comparativa ENVELOPE BESTEST è stata ampliata in modo da poter validare anche i modelli di simulazione dei sistemi meccanici. Questa estensione, nota come HVAC BESTEST Cases E100-E200, consiste in una serie di casi test in regime stazionario provvisti di soluzione analitica. Tali casi test implementano un impianto HVAC semplificato, operante in regime stazionario, inserito in un involucro edilizio semplificato, quasi adiabatico. I carichi a cui deve soddisfare l'impianto, sono guidati da carichi interni, sensibili e latenti, definiti dall'utente in modo che la sensibilità del programma di simulazione consenta di analizzare più parametri prestazionali, e quindi la verifica del software stesso. I valori di output dei vari esercizi (es. consumo elettrico del compressore e del ventilatore, carichi sensibili e latenti elaborati dalla batteria alettata, COP, temperatura e umidità nelle diverse zone) vengono confrontati e usati congiuntamente in una logica diagnostica per determinare l'algoritmo responsabile di previsioni differenti da quelle di riferimento.

In questi casi test, come riassunto in Tabella 19, si fanno variare i seguenti parametri:

- carichi interni sensibili
- carichi interni latenti
- setpoint del termostato di zona (temperatura a bulbo secco in ingresso EDB)
- temperatura a bulbo secco esterna (ODB)

Per ottenere una temperatura a bulbo secco esterna stazionaria, nel file di dati meteorologici allegato al report originale, le temperature ambiente a bulbo secco sono state impostate costanti.

Le variazioni dei vari parametri permettono di isolare singolarmente, e in varie combinazioni predefinite, gli effetti dei vari fattori; in questo modo è possibile verificare i modelli di simulazione focalizzandosi su differenti parametri prestazionali con diverse configurazioni valutando l'influenza:

- del funzionamento a carico parziale (PLR = Part Load Ratio)
- della variazione del rapporto tra calore sensibile e latente (SHR = Sensible Heat Ratio)
- delle operazioni di raffrescamento con o senza deumidificazione
- delle operazioni nelle condizioni standard ARI¹² (Air-Conditioning and Refrigeration Institute)

Note le ipotesi caratterizzanti ogni caso test, sono date anche le soluzioni analitiche che rappresentano una soluzione probabile, matematicamente corretta dell'esercizio. Le assunzioni fisiche che riguardano l'impianto HVAC sono rappresentative di tipici dati costruttivi, normalmente usati dai progettisti, che molti software di simulazione sono in grado di analizzare per consentire così una progettazione più veritiera. Inizialmente sono state sviluppate autonomamente due soluzioni analitiche, che in seguito sono state confrontate e migliorate come descritto più

¹² Le condizioni standard ARI prescrivono: EDB = 26.7 °C, EWB = 19.4 °C, ODB = 35.0 °C.

avanti. Per valutare le possibili cause di difformità tra i risultati delle simulazioni e le soluzioni analitiche, viene fornito un diagramma diagnostico riportato in Figura 43.

La configurazione della struttura test di base (caso E100) è una singola zona rettangolare, senza finestre, quasi adiabatica con soli carichi interni definiti dall'utente (geometria identica a quella dell'ENVELOPE BESTEST ma ora senza finestre). Dal momento che due programmi non richiedono esattamente gli stessi input, si è cercato di descrivere i vari casi test in modo da permetterne l'esecuzione su più software, pur mantenendo le specifiche geometriche e dei materiali il più semplici possibili cosicché da minimizzare l'eventuale introduzione, da parte dell'utente, di errori sui dati di input.

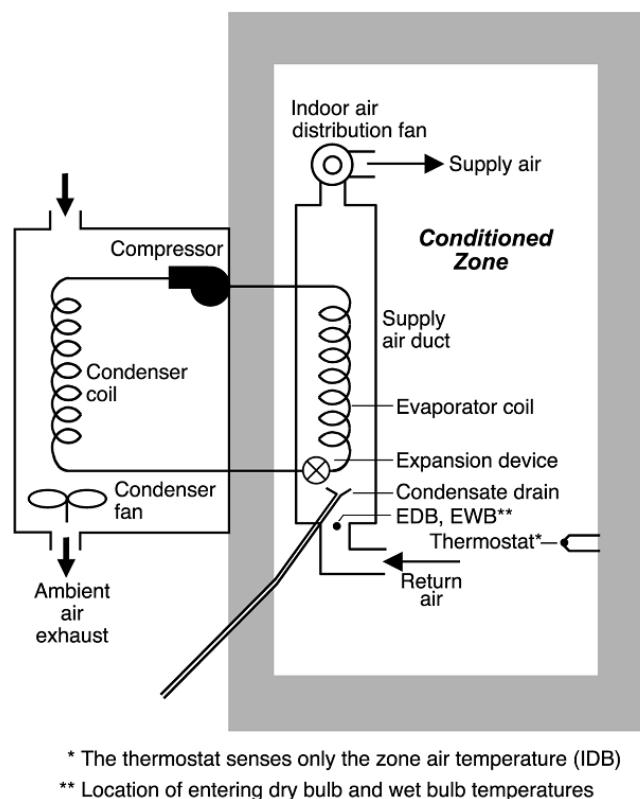


Figura 38 - HVAC BESTEST: schema impianto di climatizzazione, casi E100-E200
 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2002)

L'impianto, mostrato in Figura 38, rappresenta un sistema separato formato da una unità condensante esterna che raffredda l'aria e una unità interna che racchiude l'evaporatore. Le caratteristiche tecniche del sistema meccanico sono incluse nel documento completo a cui si fa riferimento. Vengono forniti i dati a pieno carico in un formato simile ad un tipico catalogo di un costruttore. Questi dati comprendono: totale capacità termica elaborabile (sensibile + latente), potenza del compressore, punto di rugiada del macchinario come funzione di $f(\text{ODB}, \text{EWB})$ dove EWB indica la temperatura bulbo umido in ingresso. Inoltre il carico sensibile elaborabile è dato come funzione di $f(\text{ODB}, \text{EWB}, \text{EDB})$ ¹³ mentre per considerare l'abbassamento del COP ai carichi parziali viene fornita una curva ideale funzione di $f(\text{PLR})$ riportata in Figura 39.

¹³ Abbreviazioni: ODB = Outdoor Dry Bulb; EWB = Entering Wet Bulb; EDB = Entering Dry Bulb.

Per facilitare l'inserimento degli input, in conformità con quelli richiesti dai vari software di simulazione, sono incluse delle istruzioni dettagliate che solitamente sono assenti nei cataloghi. Gli stessi dati, seguendo tali istruzioni, sono stati raccolti in tabelle con tre diverse forme:

- Capacità termiche nominali al netto del calore nominale assorbito dall'aria (rapportato al nuovo valore di portata elaborata) che è diverso da quello attuale
- Capacità termiche totali (inclusendo il calore assorbito dall'aria con la nuova portata elaborata)
- Capacità termiche aggiustate con gli attuali valori di riferimento: capacità termiche nominali, includendo il calore assorbito dall'aria con la nuova portata, al netto dell'attuale quantità di calore assorbita

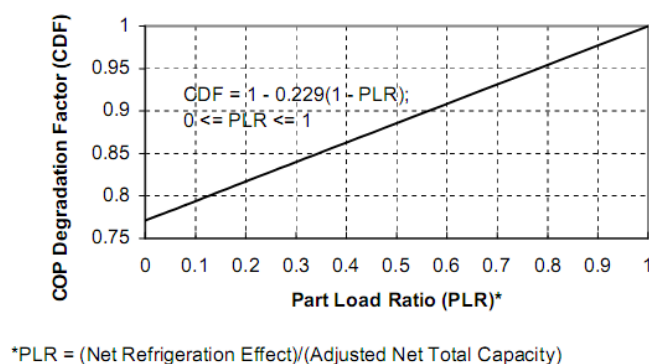


Figura 39 - HVAC BESTEST: coefficiente correttivo per funzionamento a carico variabile
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2002)

Case no.	Zone data		Weather		Comments
	Internal gains*		Setpoint	ODB	
	Sensible [W]	Latent [W]	EDB [°C]		
Dry zone series					
E100	5400	0	22.2	46.1	Base case, dry coil. High PLR.
E110	5400	0	22.2	29.4	High PLR. Tests low ODB versus E100.
E120	5400	0	26.7	29.4	High PLR. Tests high EDB versus E110. Tests ODB & EDB interaction versus E100.
E130	270	0	22.2	46.1	Low PLR test versus E100.
E140	270	0	22.2	29.4	Tests ODB at low PLR vs E130. Tests PLR at low ODB vs E110.
Humid zone series					
E150	5400	1100	22.2	29.4	High PLR. High SHR. Tests latent load versus E110.
E160	5400	1100	26.7	29.4	High PLR. High SHR. Tests EDB versus E150.
E165	5400	1100	23.3	40.6	High PLR. High SHR. Tests ODB & EDB interaction with latent load versus E160.
E170	2100	1100	22.2	29.4	Mid PLR. Mid SHR. Tests low sensible load versus E150.
E180	2100	4400	22.2	29.4	High PLR. Low SHR. Tests SHR versus E150. Tests high latent load versus E170.
E185	2100	4400	22.2	46.1	High PLR. Low SHR. Tests ODB versus E180.
E190	270	550	22.2	29.4	Low PLR. Low SHR Tests low PLR at constant SHR vs E180. Tests latent load at low PLR versus E140.
E195	270	550	22.2	46.1	Low PLR. Low SHR Tests ODB at low PLR & SHR versus E190. Tests low PLR at constant SHR vs E185. Tests latent load at low PLR versus E130.
Full load test at ARI conditions					
E200	6120	1817	22.2	35.0	Tests for ARI indoor wetbulb temperature at full sensible and latent loads.

Abbreviations:

PLR = Part Load Ratio; ODB = outdoor drybulb temperature;

EDB = entering drybulb temperature; vs = versus;

SHR = Sensible Heat Ratio; ARI = Air Conditioning and Refrigeration Institute.

* Internal Gains are internally generated sources of heat and humidity that are not related to operation of the mechanical cooling system or its air distribution fan.

Tabella 19 - HVAC BESTEST: descrizione casi test E100-E200
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2002)

4.3.3.1 Produzione dei risultati analitici

Le soluzioni analitiche incluse nell'HVAC BESTEST Cases E100-E200, rappresentano uno "standard matematicamente veritiero" ovvero, definiti i casi test e note le varie assunzioni specifiche, c'è una soluzione matematicamente corretta per ogni caso di verifica proposto. In questo contesto, le ipotesi e i dati caratterizzanti l'impianto di climatizzazione, sono rappresentativi di tipici dati costruttivi normalmente individuabili nei cataloghi dei costruttori, e che molti software di simulazione sono predisposti ad utilizzare.

È importante comprendere la differenza tra uno "standard matematicamente veritiero" e uno "standard assolutamente veritiero". Nel primo caso, si accettano le ipotesi date pur riconoscendo il fatto che rappresentano una semplificazione della realtà. Nell'ultimo caso, la validazione che segue uno standard "assolutamente vero" dovrebbe confrontare i risultati delle simulazioni con un esperimento pratico "perfettamente eseguito", il quale fornisce inoltre, "specificando perfettamente", gli input necessari per eseguire la simulazione. In realtà, un esperimento viene eseguito, e l'oggetto della sperimentazione viene descritto, entro un margine di incertezza accettabile.

Due¹⁴ delle organizzazioni partecipanti all'IEA-SHC Task 22 svilupparono indipendentemente le soluzioni analitiche, che successivamente sono state sottoposte ad una terza componente specializzata in matematica applicata. Il confronto tra i risultati mostrava alcune divergenze che poi sono state risolte, dopo aver consentito agli sviluppatori la lettura delle osservazioni della terza componente e di vedere e criticare a vicenda le due tecniche di soluzione. Questo processo ha portato entrambi gli sviluppatori a modificare in maniera logica e non arbitraria le loro procedure risolutive, cosicché la maggior parte dei risultati finali differiscono per meno dell'1%. Le rimanenti difformità nelle soluzioni analitiche sono imputabili in parte alla difficoltà con cui si devono imporre le condizioni al contorno. In questo caso, le condizioni al contorno sono un compromesso tra la totale realtà delle cose e qualche semplificazione del reale sistema fisico analiticamente risolvibile. Pertanto, le soluzioni analitiche hanno alcuni elementi di interpretazione sull'esatta natura delle condizioni al contorno che causano piccole difformità tra i risultati. Ad esempio, nella modellazione del controller, un gruppo ha derivato la soluzione analitica per un controller ideale (che mantiene la temperatura della zona esattamente al valore di setpoint) mentre l'altro gruppo ha sviluppato una soluzione numerica per un controller realistico (che permette una piccola variazione della temperatura di zona all'interno di un limitato lasso di tempo). Ogni soluzione produce risultati leggermente diversi, ma entrambe sono corrette nel contesto di questo esercizio. Questo potrebbe essere imperfetto dal punto di vista di un matematico, ma è abbastanza accettabile da un punto di vista ingegneristico. Specifici esempi di piccole differenze rimanenti nelle soluzioni vengono discussi nella *Part II* della relazione tecnica completa [18].

Il restante disaccordo tra le soluzioni analitiche è abbastanza piccolo tale da consentire l'individuazione di bug nei software che altrimenti non sarebbero emersi dal confronto diretto tra

¹⁴ Hochschule Technik + Architektur Luzern (HTAL), e la Technische Universität Dresden (TUD)

software e, di conseguenza, migliora la capacità diagnostica della procedura di validazione proposta in questa sezione.

4.3.3.2 Errori trovati nei software di simulazione

Nella fase di verifica, la metodologia diagnostica dell'HVAC BESTEST ha soddisfacentemente evidenziato errori in ognuno dei software di simulazione selezionati dall'IEA-SHC Task 22. Questa lista è riassunta in Tabella 20. Molti degli errori elencati in tabella erano significativi, con un effetto talvolta maggiore del 50 % sul fabbisogno energetico totale o in taluni casi sul COP.

In altri casi, per alcuni programmi, qualche errore provocava un effetto relativamente marginale sul fabbisogno energetico totale (<2%), tuttavia quando un programma è affetto da più errori di minore intensità, tali errori non si compensano necessariamente l'un l'altro e, in alcuni casi, potrebbero essere cumulativi. Inoltre, alcuni errori che hanno un effetto secondario sul consumo energetico globale potrebbe avere un effetto ben più rilevante per dei casi test non previsti in questa procedura, pertanto la correzione di errori minori è parimente importante di quelli più evidenti.

Una breve descrizione del processo diagnostico usato per l'individuazione di specifici bug è inclusa più avanti, mentre una discussione dettagliata in merito all'utilizzo della tecnica diagnostica HVAC BESTEST coi software CA-SIS e CLIM2000 è presentato in Hayez et al. 2001 [7].

TRNSYS-TUD problema con l'uso di variabili in semplice precisione

TRNSYS è il programma principale per l'analisi dei sistemi solari negli Stati Uniti; TRNSYS-TUD è una versione personalizzata con gli algoritmi sviluppati da Technische Universität Dresden (TUD), Germania. Per la serie iniziale dei risultati a bassi carichi parziali (casi E130, E140, E190 e E195), ci sono stati grandi errori (43-48%), nei carichi sensibili e latenti scambiati dalla batteria alettata, che si sono propagati attraverso le previsioni del fabbisogno energetico. Per il caso a carico parziale medio (caso E170 mid-PLR), l'errore sul consumo energetico è stato elevato (14%). La diagnostica ha indicato che il problema potrebbe essere l'applicazione della curva di carico parziale, in un'ulteriore revisione del codice, gli autori hanno scoperto un problema con l'utilizzo delle variabili in singola precisione in una delle subroutine di calcolo associate con il loro modello che simula un controller realistico. Questo ha causato errori di arrotondamento, che sono diventati rilevanti nei carichi ridotti.

La Figura 40 documenta i risultati delle simulazioni prima e dopo la correzione del problema, e include un confronto con la soluzione analitica TUD (successivamente verificata coi risultati analitici HTAL). La figura mostra che al variare della precisione di calcolo di determinate variabili (da singola a doppia precisione), i risultati della simulazione risultano notevolmente migliorati.

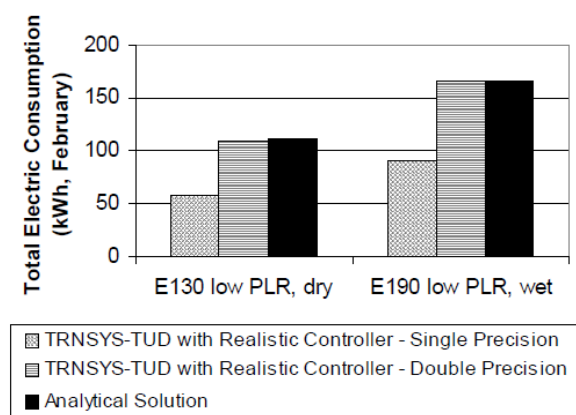


Figura 40 - HVAC BESTETS: problema con variabile a semplice precisione in TRNSYS-TUD
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2002)

Software	Error description ^A	% Disagreement ^{A,B}	Resolution
CA-SIS	No extrapolation of performance data allowed	Possibly up to 10% power ^C (E110, E100)	Manually fixed ^D
CA-SIS	Convergence algorithm problem	E200 would not run	Fixed
CA-SIS	Fan heat not added to coil load	4% sensible coil load (4% power ^C f(SHR) ^E)	Fixed
CA-SIS	Indoor and outdoor fan power not f(PLR)	2% power ^C (mid PLR)	Fixed
CLIM2000	Verify new model improvements ^F	Up to 50% COP change from earlier model	Verified improved
CLIM2000	Compressor and fan powers exclude COP = f(PLR) degradation	20% power ^C (low PLR) 13% power ^C (mid PLR)	Fixed
CLIM2000	Performance map extrapolation problem	9% power ^C (E110)	Fixed
DOE-2.1E (JJH ver. < w54)	Minimum suppli temperature coding error in early RESYS2 ^G system	36% COP (earlier base case ^H)	Fixed
DOE-2.1E (JJH ver. 133)	Coil-zone load difference disagrees with fan power for RESYS2 ^G at low SHR	5% sensible coil load (at low SHR)	Verified improved
DOE-2.1E (JJH ver. 133)	Bypass factor = f(EWB, ODB) insensitivity	1% power ^C (E185)	Verified improved
DOE-2.1E (JJH 133, ESTSC 088)	Indoor fan power not f(PLR) (RESYS2 and PTAC) ^G	2% total power (at mid PLR)	Verified improved
DOE-2.1E (ESTSC v 088)	Coil-zone load difference disagrees with fan power for PTAC ^G at low SHR	2% sensible coil load (at low SHR)	Verified improved
ENERGYPLUS	Reported coil loads not f(PLR)	Up to 2500% coil load (at low PLR); 0% power ^C	Fixed
ENERGYPLUS	Calculation of SHR and bypass factor	1-2% power ^C	Fixed
ENERGYPLUS	Heat of vaporization for latent coil calculation	0.4-2.5% power ^C	Fixed
ENERGYPLUS	Indoor fan power not f(PLR)	2% power ^C (mid PLR)	Fixed
PROMETHEUS	Compressor COP = f(PLR) calculated in external post-processor to software	20% power ^C (low PLR) if no post-processor calc.	Authors notified
TRNSYS-TUD (realistic control)	Use of some single precision variables	45% power ^C (lo PLR) 14% power ^C (midPLR)	Fixed
TRNSYS-TUD (realistic control)	Wrong data compiled for coil latent load output	4% power ^C (E150) 3% latent coil load (E170)	Fixed

^A Abbreviations: PLR = Part Load Ratio; ODB = outdoor drybulb temperature; EDB = entering drybulb temperature; vs = versus; SHR = Sensible Heat Ratio.

^B Specific cases or conditions relevant to the described disagreement are included in parenthesis.

^C Total system power

^D Current results include non-automated version of the fix.

^E Percentage disagreement is greatest at high SHR and decreases as SHR decreases.

^F The software authors used HVAC BESTEST to document the improvement of their new model relative to a previous model that they were in the process of replacing when IEA SHC Task 22 began.

^G In DOE-2.1E the RESYS2 system is for modeling typical residential equipment (e.g. a unitary split system), and PTAC is for modeling a packaged terminal air-conditioning system.

^H This error was discovered using a preliminary version of HVAC BESTEST which had a base case different from E100.

Tabella 20 - HVAC BESTEST: panoramica sui bug individuati e corretti, casi E100-E200
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2002)

Valutazioni sui programmi di simulazione

Nel complesso, i miglioramenti ai software di simulazione risultano evidenti confrontando i risultati iniziali con quelli attuali.

In Figura 41 sono mostrati i risultati per il COP della simulazione iniziale (ottenuti dopo il primo ciclo di simulazioni, prima di sviluppare le soluzioni analitiche); le abbreviazioni lungo l'asse delle ascisse indicano la descrizione dei vari casi test (cfr. Tabella 19). Questi risultati indicano un disaccordo medio variabile dal 2% al 30% rispetto alla media dei risultati simulati; la corrispondente incongruità sul fabbisogno energetico è del 4-40%.

Nella Figura 42 sono inclusi i risultati attuali per il COP per tutti i casi test e le soluzioni analitiche, le abbreviazioni lungo l'asse orizzontale sono le stesse della Figura 41. Tre set di risultati analitici sono indicati nella leggenda: "Analytical/TUD", "Analytical/HTAL1", e "Analytical/HTAL2". Tali soluzioni analitiche sono descritte in dettaglio nella *Part II* della relazione finale [18].

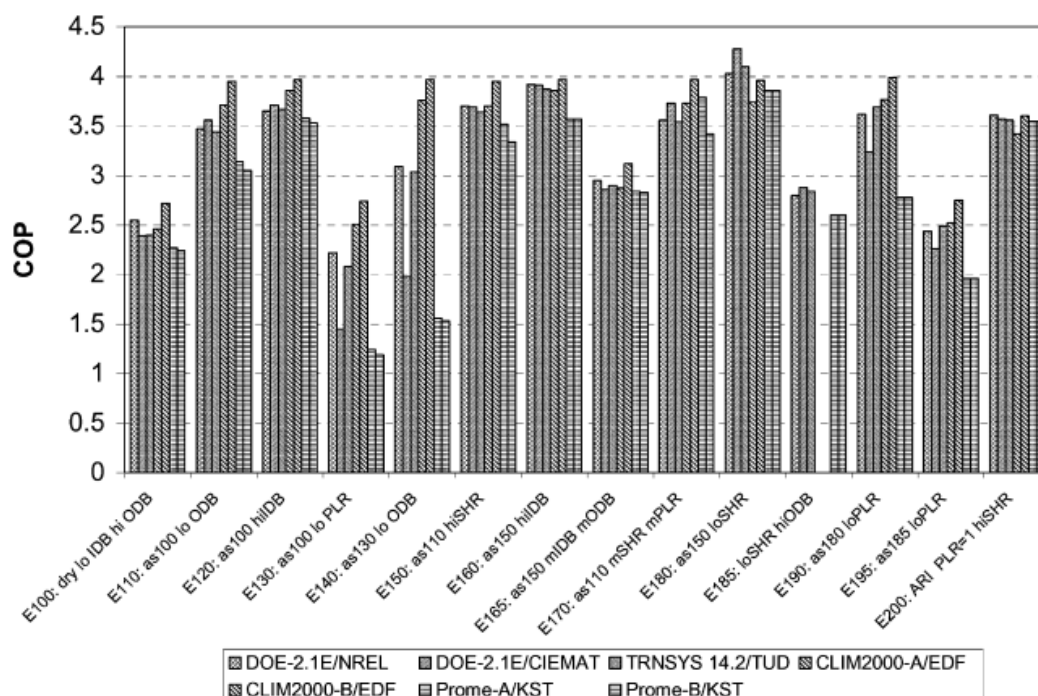


Figura 41 - HVAC BESTEST: COP prima della correzione degli errori, tramite diagnostica BESTEST (Fonte: Neymark et al., 2002)

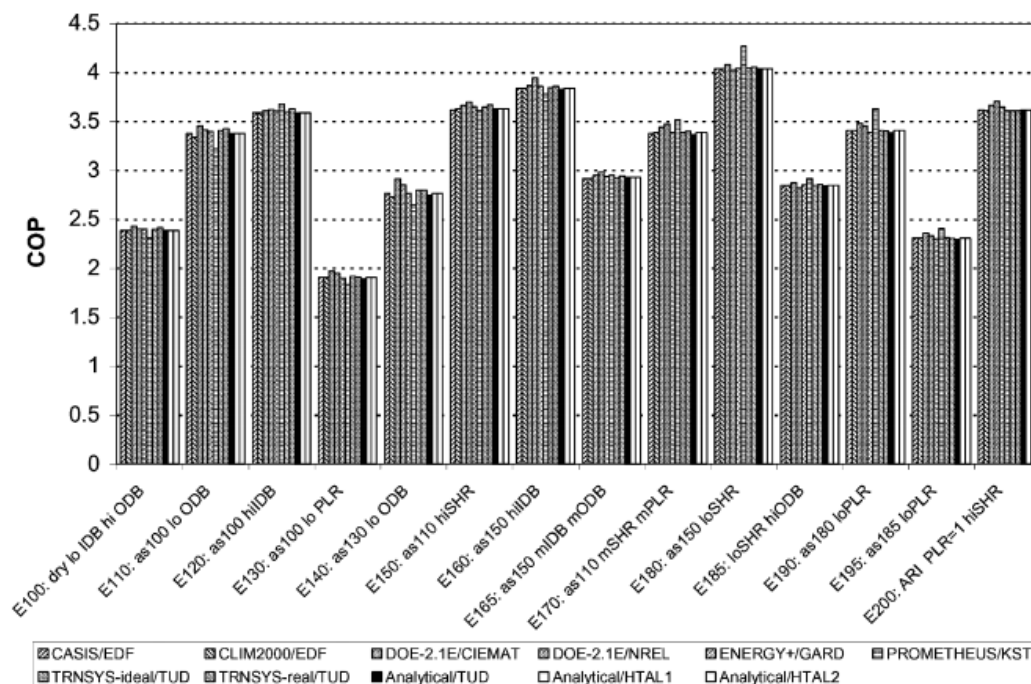


Figura 42 - HVAC BESTEST: COP dopo la correzione degli errori, tramite diagnostica BESTEST
(Fonte: Neymark et al., 2002)

Dopo la correzione degli errori utilizzando la diagnostica HVAC BESTEST, la media di tutti i risultati simulati del COP e del fabbisogno energetico totale per i programmi di simulazione sono mediamente entro una banda <1% rispetto alle soluzioni analitiche, con variazioni fino al 2% per i casi a basso carico parziale senza deumidificazione (casi E130, E140). Altri intervalli di disaccordo, separati per i casi con o senza deumidificazione e per diversi parametri di output, sono riassunti nella Tabella 21. In ogni caso, questa gamma di discordanza, si basa sulla differenza fra ciascun risultato di simulazione rispetto alla media dei risultati delle soluzioni analitiche, diviso per la media dei risultati analitici $((\max - \min) / \text{media})$. Questa tabella di sintesi esclude i risultati per il software PROMETHEUS in quanto si sospettano uno o più errori che non sono stati risolti entro la conclusione del presente progetto IEA.

Il livello di disaccordo più elevato nei casi a secco (senza deumidificazione) si ha per il caso col più basso carico parziale, ed è probabilmente collegato ad alcuni potenziali problemi che sono stati risolti e documentati per DOE-2.1E (cfr. Tabella 20). Le divergenze più grandi per l'umidità relativa della zona climatizzata si hanno con CLIM2000 e DOE-2.1E/CIEMAT mentre le incongruenze maggiori tra le temperature si presentano coi risultati di TRNSYS-TUD quando si applica un controller realistico con un breve periodo di tempo (36 s); tutti gli altri risultati di simulazione modellano un controllore ideale.

Sulla base dei risultati ottenuti dall'applicazione dell'HVAC BESTEST, i programmi sembrano affidabili, per i parametri prestazionali analizzati, quando l'apparecchio funziona in condizioni pressoché nominali.

Cases	Dry coil (E100-E140)	Wet coil (E150-E200)
COP and Total Electric Consumption	0% - 6% ^A	0% - 3% ^A
Zone Humidity Ratio	0% - 11% ^A	0% - 7% ^A
Zone Temperature	0.0°C – 0.7°C (0.1°C) ^B	0.0°C – 0.5°C (0.0°C – 0.1°C) ^B

^A Percentage disagreement for each case is based on the difference between each simulation result (excluding one simulation participant that could not finish the project) versus the mean of the analytical solution results, divided by the mean of the analytical solution results.

^B Excludes results for TRNSYS-TUD with realistic controller.

Tabella 21 - HVAC BESTEST: intervalli di discordanza sui risultati di simulazione
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2002)

4.3.3.3 Diagrammi diagnostici

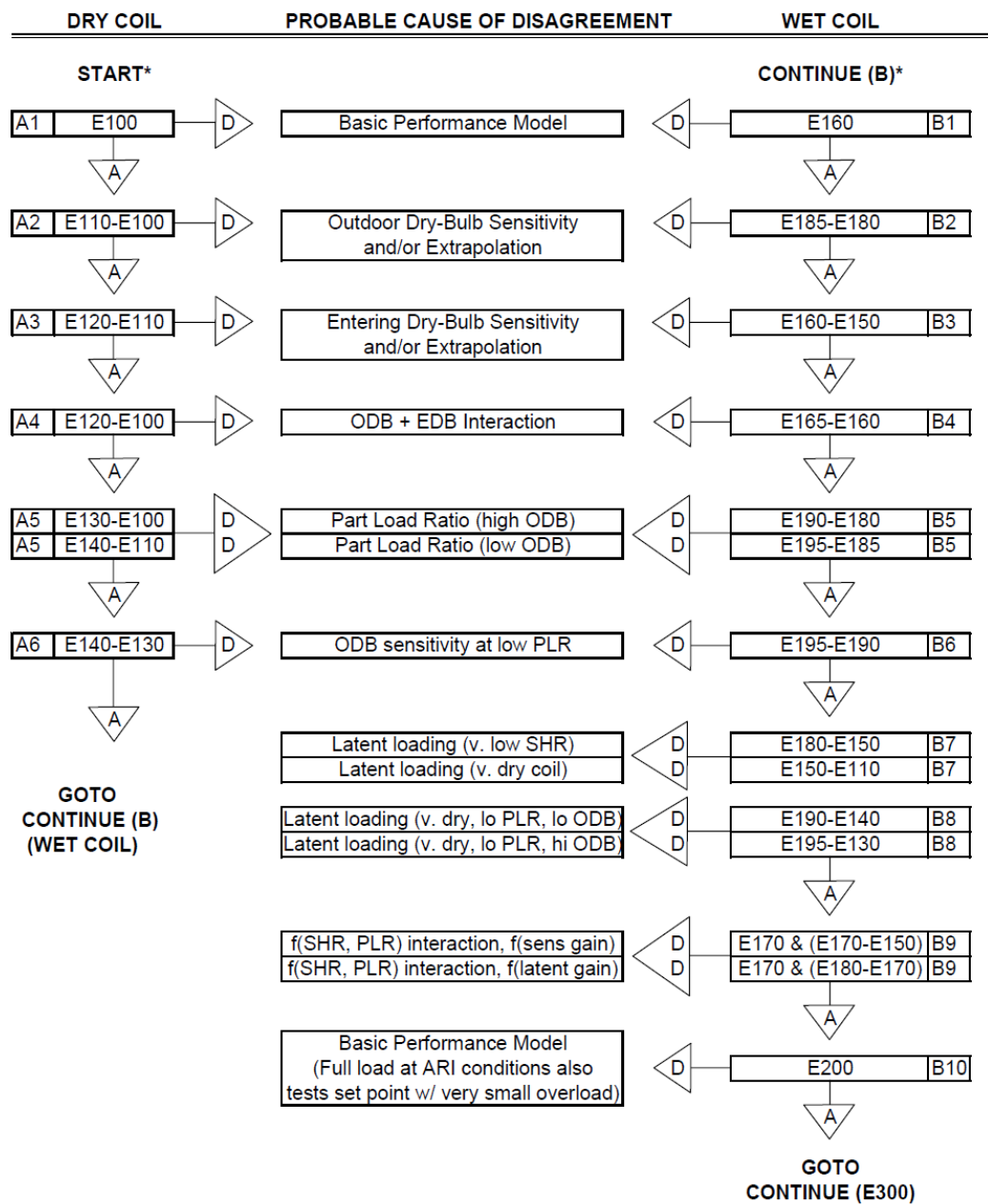
Similmente ad ogni procedura BESTEST, il report completo è corredato da un diagramma di flusso utile per la definizione dello scopo e dell'ordine con cui eseguire i vari test.

Onde evitare inutili ripetizioni di quanto già esposto nei paragrafi precedenti, ci limitiamo a ribadire i seguenti concetti fondamentali:

- L'esecuzione di tutti i test, per poi verificarne i risultati seguendo i diagrammi, è il metodo più efficace ma richiede molto tempo, in alternativa si consiglia l'esecuzione dei vari casi seguendo le indicazioni dei diagrammi.
- I diagrammi forniscono un'indicazione sulla probabile causa di eventuali anomalie tra i risultati, in quanto ogni caso test è mirato a stressare algoritmi di calcolo specifici.
- I test indicati, ad esempio, con "E110-E100" suggeriscono il confronto (di sensibilità) tra i risultati del caso E110 con quelli del caso E100. In particolare si deve porre particolare attenzione all'intensità della differenza tra i due risultati (*delta results*) ed il loro segno.
- Se un test fallisce, è sconsigliato procedere con quelli successivi se non dopo aver individuato le fonti di tali discordanze, ed eventualmente aver corretto gli algoritmi difettosi.
- Nelle operazioni di confronto tra i risultati del software in esame con quelli di riferimento, risultano molto utili i file allegati al report completo (in formato excel) in quanto prevedono l'inserimento dei nuovi dati, confrontandoli automaticamente coi risultati di riferimento in grafici e tabelle.

Esempio pratico

Un software mostra dei buoni risultati col caso E100, ma le anomalie con la soluzione analitica sulla previsione del fabbisogno energetico per il caso E130 sono evidenti. Il diagramma diagnostico suggerisce un potenziale errore nell'algoritmo che include gli effetti delle operazioni a carico parziale sul consumo energetico per una batteria allettata senza deumidificazione.



ABBREVIATIONS

A = Agree; i.e., agree with analytical solution results for the case itself and the sensitivity case. E.g., to check for agreement regarding Case E130, compare example results for Case E130 and E130-E100 sensitivity.

D = Disagree; i.e., show disagreement with analytical solution results.

NOTES

* It is better to perform/analyze results of these tests in blocks such as E100-E140 and E150-E200.

Figura 43 - HVAC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi in regime stazionario (E100-E200)
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2002)

4.3.4 HVAC BESTEST: Cases E300-E545

Il secondo volume della raccolta HVAC BESTEST rappresenta un'estensione della serie di prove raccolte nel precedente volume. I casi E100-E200 sono limitati al regime stazionario e possono quindi essere risolti analiticamente, il secondo volume (casi E300-E545) include gli effetti dinamici del sistema e altri casi test che non possono essere risolti analiticamente.

Questo documento è diviso in tre parti:

- Parte I) spiega i vari test e come applicare la procedura HVAC BESTEST Cases E300-E545 con un approccio molto schematico se non addirittura manualistico;
- Parte II) descrive la procedura adottata per lo sviluppo, nel campo dei test svolti, e la produzione dei dati di riferimento,
- Parte III) presenta i risultati dei programmi di riferimento in forma di tabelle e grafici.

In questo volume sono presenti 20 casi test aggiuntivi in grado di verificare l'abilità di analisi e previsione, di un software di simulazione, delle prestazioni dell'impianto schematizzato usando dati realistici, su base oraria, e dati climatici annuali per climi caldi e umidi.

La configurazione dell'edificio base di questi test (caso E300) è una singola zona rettangolare con un volume pari a 588 m^3 (vedi Figura 44), quasi adiabatica con carichi interni definiti dall'utente e dati climatici esterni dinamici assegnati.

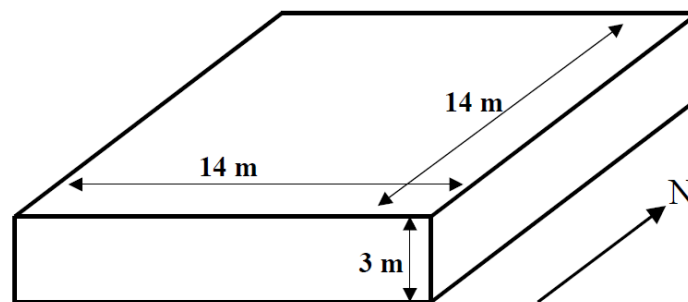
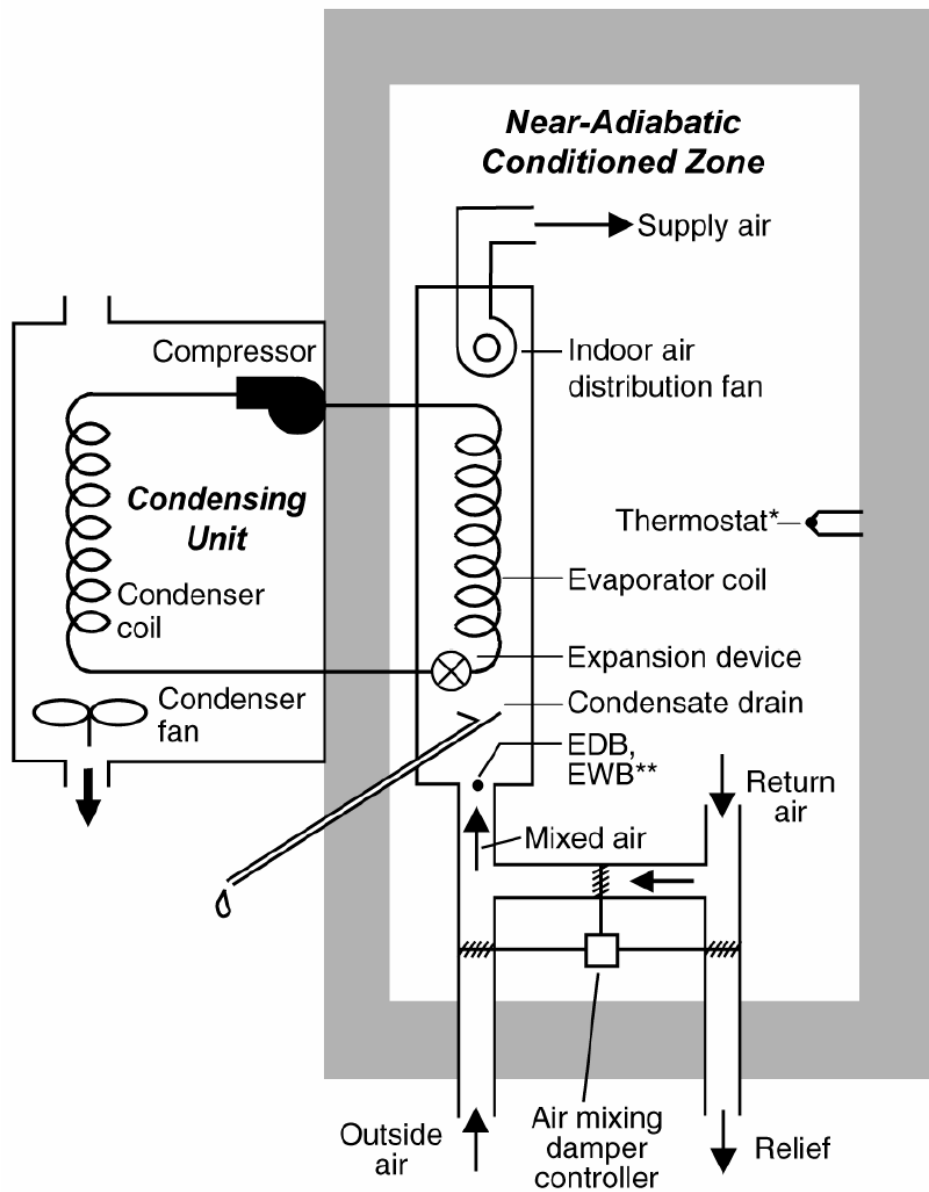


Figura 44 - HVAC BESTEST: geometria del caso base E300 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)

L'impianto meccanico rimane a compressione di vapore, ma è diverso da quello usato nei casi E100-E200 infatti, come si evince dalla Figura 45, è stato introdotto un sistema di miscelazione dell'aria cosicché risulta possibile testare la miscelazione con l'aria esterna e il sistema di controllo dell'economizzatore.

Come mostrato in Tabella 22, per sviluppare compiutamente i vari test, si fanno variare i seguenti parametri:

- Carichi interni sensibili
- Carichi interni latenti
- Infiltrazioni
- Frazione d'aria esterna
- Setpoint del termostato
- Impostazioni del sistema di controllo dell'economizzatore



* The thermostat senses only the zone air temperature (IDB).

** Entering dry-bulb and wet-bulb temperatures.

Figura 45 - HVAC BESTEST: schema impianto di climatizzazione, casi E100-E200
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)

	Internal gains		Cooling setpoint	Infiltration	Outside air	
Case no.	Sensible	Latent	[°C]	[ACH]	[ACH]	Comments
Preliminary Series						
E300 Base Case (15% OA)	mid	mid	25	0	1.734	Supply fan runs continuously, compressor cycles as needed, expanded performance data. Tests outside air versus E500.
E310 High latent load	mid	high	25	0	1.734	Tests high latent load versus E300.
E320 Infiltration	mid	mid	25	11.558*	0.000	Tests high infiltration versus E300, E330.
E330 Outside air	mid	mid	25	0	11.558*	Tests high outside air versus E300, E320.
E340 Infil./OA interaction	mid	mid	25	5.779*	5.779*	Tests infil./OA interaction versus E300, and E320 or E330.
E350 Thermostat set up	mid	mid	25/35	0	1.734	Tests thermostat set up control versus E300.
E360 Undersize	high	mid	25	0	1.734	Tests overloaded system versus E300.
Economizer Series					Min OA	(Temperature control: E400, E410, E420)
E400 Temperature control	mid	mid	25	0	1.734	Tests temperature economizer versus E300.
E410 Compressor lockout	mid	mid	25	0	1.734	Tests E400 with compressor lockout versus E300.
E420 ODB limit	mid	mid	25	0	1.734	Tests ODB limit (20°C) control versus E300.
						(Enthalpy control: E430, E440)
E430 Enthalpy control	mid	mid	25	0	1.734	Tests enthalpy control versus E300.
E440 Outdoor enthalpy limit	mid	mid	25	0	1.734	Tests outdoor enthalpy limit control versus E300.
0% OA Cases					OA	(Wet coils: E500 - E525)
E500 Base Case (0% OA)	mid2	mid2	25	0	0**	Like E100 but with dynamics & expanded performance data. Supply fan cycles ON/OFF with compressor. Hourly output tests COP f(ODB).
E510 High PLR	high2	high2	25	0	0**	High PLR. SHR same as E500. Tests PLR versus E500.
E520 Low EDB = 15°C	mid2	mid2	15	0	0**	Tests EDB = 15°C versus E500.
E522 Low EDB = 20°C	mid2	mid2	20	0	0**	Tests EDB = 20°C versus E500.
E525 High EDB	mid2	mid2	35	0	0**	Tests EDB = 35°C versus E500, E520.
						(Dry coils: E530 - E545)
E530 Dry Coil	mid2	0	25	0	0**	Tests dynamic dry-coil expanded performance versus E500. Hourly output tests COP f(ODB).
E540 Dry Coil, Low EDB	mid2	0	15	0	0**	Tests EDB = 15°C versus E530.
E545 Dry Coil, High EDB	mid2	0	35	0	0**	Tests EDB = 35°C versus E530.
Abbreviations: ACH = air changes per hour; COP = coefficient of performance; EDB = entering dry-bulb temperature; OA = outside air; ODB = outdoor dry-bulb temperature; PLR = part load ratio; SHR = sensible heat ratio.						
Notes: "mid" internal gains schedules are relatively high daytime and low nighttime periodically/seasonally adjusted values. See case descriptions for details.						
"mid2" is similar to "mid" but with 0 cooler-month internal gains to get 0 cooling at ODB <55°F for 0 OA. See case descriptions.						
"high" and "high2" are greater loads relative to "mid" and "mid2," respectively.						
* Apr. 21 - Oct. 12, 8:00 - 20:00 only; see case descriptions for specific schedule.						
**OA = 0 implies fan cycles ON/OFF with compressor.						

Tabella 22 - HVAC BESTEST: descrizione casi test E300-E545 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)

Come si può riscontrare in Tabella 23, che mostra i carichi interni che l'utente deve impostare per il caso E300, i carichi interni sensibili e latenti variano sia nell'arco dell'anno che della fascia oraria giornaliera.

Inoltre, nella relazione tecnica completa è presente una raccolta espansa dei dati di funzionamento a pieno carico dell'impianto. Le tabelle usano ODB, EDB, ed EWB come parametri indipendenti e mostrano la capacità termica lorda dell'unità, ovvero la totale capacità termica senza detrarre il calore acquistato dall'aria. Questa serie di dati è stata sviluppata da un costruttore, usando il software che la società normalmente adopera per la redazione dei dati inseriti nei cataloghi. Questa mole di dati va oltre il normale range di dati pubblicati nei cataloghi, ed inoltre ricopre anche quelle zone dove sono concesse solo limitate operazioni. Tali intervalli sono indicati nelle tabelle con lo sfondo rosso e blu (nel caso si faccia riferimento alla versione elettronica di questo documento). Lo sfondo rosso indica la zona in cui la temperatura del refrigerante scaricato dal compressore è più alta di quanto dovrebbe essere; un funzionamento prolungato in questa regione potrebbe ridurre la durata del compressore. Lo sfondo blu invece indica l'intervallo dove si possono formare le condizioni di gelo sullo scambiatore di calore; il che influisce sulle prestazioni del sistema. La Tabella 24 fornisce un estratto di questi dati.

Period	Hours	SENSIBLE		LATENT	
		Watt	frac v. max *	Watt	frac v. max *
Jan. 1 – Mar. 10	0:00 – 8:00	2931	0.15625	0	0.00
	8:00 – 20:00	2931	0.15625	366	0.25
	20:00 – 24:00	2931	0.15625	0	0.00
Mar. 11 – Apr. 10	0:00 – 9:00	2931	0.15625	0	0.00
	9:00 – 18:00	7034	0.37500	1466	1.00
	18:00 – 24:00	2931	0.15625	0	0.00
Apr. 11 **	0:00 – 8:00	2931	0.15625	0	0.00
	8:00 – 20:00	2931	0.15625	366	0.25
	20:00 – 24:00	2931	0.15625	0	0.00
Apr. 12 – Apr. 20	0:00 – 8:00	2931	0.15625	0	0.00
	8:00 – 19:00	9379	0.50000	1466	1.00
	19:00 – 24:00	2931	0.15625	0	0.00
Apr. 21 – Oct. 12	0:00 – 8:00	7034	0.37500	0	0.00
	8:00 – 12:00	9379	0.50000	1466	1.00
	12:00 – 14:00	14069	0.75000	1466	1.00
	14:00 – 16:00	18758	1.00000	1466	1.00
	16:00 – 20:00	9379	0.50000	1466	1.00
	20:00 – 24:00	7034	0.37500	0	0.00
Oct. 13 – Oct. 18	0:00 – 8:00	2931	0.15625	0	0.00
	8:00 – 16:00	9379	0.50000	1466	1.00
	16:00 – 24:00	2931	0.15625	0	0.00
Oct. 19 – Nov. 5	0:00 – 8:00	2931	0.15265	0	0.00
	8:00 – 12:00	9379	0.50000	1466	1.00
	12:00 – 14:00	14069	0.75000	1466	1.00
	14:00 – 16:00	18758	1.00000	1466	1.00
	16:00 – 20:00	9379	0.50000	1466	1.00
	20:00 – 24:00	7034	0.37500	0	0.00
Nov. 6 – Dec. 31 **	0:00 – 8:00	2931	0.15625	0	0.00
	8:00 – 20:00	2931	0.15625	366	0.25
	20:00 – 24:00	2931	0.15625	0	0.00

Note: listed values are the internal gain for each hour within the specified period.

* "frac v. max" is the corresponding fraction for the given hourly value relative to the maximum value for the year. This is included for convenience of users who may need to provide this input.

** Same schedule as for Jan. 1 through Mar. 10.

Tabella 23 - HVAC BESTEST: carichi interni, caso E300 (Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)

ODB = 23.89 [°C]										
EWB		EDB[°C]								
[°C]		12.78	15.56	18.33	21.11	23.89	26.67	29.44	32.22	35.00
4.44	TC	24.88								
	SHC	24.88								
	kW	7.1								
7.22	TC	25.06	26.59	28.31						
	SHC	24.52	26.59	28.31						
	kW	7.1	7.3	7.6						
10.00	TC	27.20	27.29	28.31	30.08					
	SHC	19.12	24.80	28.31	30.08					
	kW	7.4	7.4	7.6	7.8					
12.78	TC	29.72	29.77	29.81	30.26	31.86				
	SHC	13.22	19.05	24.78	29.74	31.86				
	kW	7.7	7.7	7.7	7.8	8.0				
15.56	TC		32.44	32.48	32.52	32.74	33.68	35.53		
	SHC		13.09	18.83	24.54	29.94	33.68	35.53		
	kW		8.0	8.0	8.0	8.1	8.2	8.4		
18.33	TC			35.29	35.42	35.47	35.54	35.99	37.39	
	SHC			12.84	18.56	24.22	29.70	34.61	37.39	
	kW			8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.6	
21.11	TC				38.38	38.48	38.56	38.57	38.83	39.51
	SHC				12.52	18.17	23.78	29.26	34.48	38.90
	kW				8.7	8.7	8.7	8.7	8.8	8.8
23.89	TC					41.59	41.75	41.85	41.89	41.97
	SHC					12.11	17.71	23.27	28.74	34.04
	kW					9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
26.67	TC						44.96	45.17	45.30	45.37
	SHC						11.64	17.19	22.69	28.12
	kW						9.4	9.4	9.5	9.5
29.44	TC							48.48	48.76	48.92
	SHC							11.12	16.61	22.06
	kW							9.8	9.8	9.9
32.22	TC								52.09	52.49
	SHC								10.56	15.98
	kW								10.2	10.2
35.00	TC									55.98
	SHC									9.98
	kW									10.6

Notes:

1. TC = gross total capacity (kW thermal)
2. SHC = gross sensible heat capacity (kW thermal)
3. kW = compressor power (kW)
4. ODB = ambient dry-bulb temperature = air temperature (°C) entering condenser
5. EDB = dry-bulb temperature (°C) entering indoor coil
6. EWB = wet-bulb temperature (°C) entering indoor coil
7. Airflow rate = indoor coil airflow rate (6796 m³/h [4000 CFM] for all data)
8. Blue background = potential for freezing indoor coil
9. Red background = compressor outside operating envelope, CANNOT RUN HERE (for prolonged operation)
10. Each point has optimum charge (R22 charge not constant)
11. Computer model used to generate catalog data
12. Computer model based on test data
13. Computer model validated within the operating envelope of compressor
14. Computer model iterates and determines if the coil is wet or dry
15. Data are for 38AKS012 matched with a 40RM012 (6796 m³/h indoors)
16. Original data provided 6/27/01; additional data provided 9/25/01 and 9/18/02
17. Data received from D. Barkley and J. Pegues of Carrier Corporation, Syracuse, New York, US.
18. SI data converted from original IP data by J. Neymark, J. Neymark & Associates, Golden, Colorado, US.

Tabella 24 - HVAC BESTEST: prestazioni a pieno carico dell'impianto
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)

4.3.4.1 Output di riferimento

Si sono condotte prove di verifica con i nuovi casi HVAC BESTEST con sei programmi simulazione del sistema edificio-impianto: CODYRUN/LGIMAT, DOE-2.1E - ESTSC version, DOE-2.2 NT, ENERGYPLUS, HOT3000, TRNSYS 14.2-TUD (con un modello realistico del controller). Il processo era iterativo, ovvero l'esecuzione delle simulazioni servì per perfezionare i casi test, e i risultati ottenuti permisero il miglioramento e la ricerca degli errori nei modelli di simulazione degli impianti.

La congruenza tra i risultati delle simulazioni e i miglioramenti fatti, sono evidenti quando si confrontano i risultati mostrati nella Figura 46 (risultati pre correzioni) con quelli di Figura 47 (risultati post correzioni). Nella relazione completa sono presenti i cosiddetti *modeler report* dove sono state riportate e commentate dettagliatamente tutte le simulazioni fatte con ogni software. In particolare in tali report si possono individuare le motivazioni di base scientifica, e non arbitrarie, che hanno indotto i programmatori alla modifica di alcuni algoritmi di calcolo.

Questi risultati indicano che inizialmente c'era una discordanza variabile tra il 3% e il 21% per il fabbisogno energetico nei casi simulati, e che c'era molta dispersione tra tutti i programmi. Col termine discordanza si sta facendo riferimento alla differenza tra il risultato massimo e minimo per ogni caso, diviso per la media dei risultati per ciascun caso ($(\max - \min) / \text{media}$). Le incongruità iniziali risultano più piccole in questi casi rispetto a quelli in regime stazionario (4% - 40% per i casi E100-E200) poiché TRNSYS-TUD, DOE-2.1E, ed EnergyPlus erano già stati migliorati durante le precedenti verifiche.

Dopo aver corretto gli errori utilizzando la diagnostica HVAC BESTEST, le rimanenti incongruenze nelle previsioni annuali sul totale fabbisogno energetico sono del 2% - 6%, con una dispersione molto più contenuta tra i vari programmi. Questo dimostra come il metodo diagnostico HVAC BESTEST possa essere usato efficacemente per correggere algoritmi difettosi anche in complessi programmi di simulazione.

Sulla base dei risultati, dopo diverse iterazioni della procedura diagnostica, e grazie al miglioramento dei modelli, i programmi testati appaiono affidabili nel campo dei parametri prestazionali analizzati e delle condizioni di lavoro dinamiche previste. I programmi si mostrano attendibili anche nella modellazione della miscelazione con aria esterna, infiltrazione, impostazioni del termostato, condizioni di sovraccarico, e vari sistemi di controllo dell'economizzatore. Questo set di risultati possono quindi essere utilizzati come riferimento su cui ci si può basare per validare un altro software.

Contrariamente ai casi in regime stazionario E100-E200, che sono stati risolti analiticamente, la natura più realistica dei casi E300-E545 permette di misurare l'importanza delle divergenze nei risultati della simulazione in termini di prestazioni energetiche annuali, e se lo si desidera, di costi energetici annuali (anche se non trattato in questa sede).

Questo è un buon modo per comprendere l'importanza delle discordanze tra i risultati. Ad esempio, una grande differenza percentuale per un certo risultato che ha solo un impatto marginale sul fabbisogno energetico annuo non può essere preoccupante, mentre una piccola differenza percentuale con un forte impatto sul consumo energetico annuo si può considerare importante. I

carichi interni adottati per i casi E300-E545 combinano aspetti tipici sia dell'involucro edilizio che di apporti termici gratuiti interni. Poiché non vi è quasi alcuna incertezza sui carichi a cui il sistema meccanico deve rispondere, tutte le divergenze nei risultati di simulazione possono essere attribuite ai modelli dell'impianto HVAC.

È quindi evidente dai risultati iniziali per il caso E300, che gli algoritmi difettosi nei modelli delle attrezzature HVAC possono facilmente rappresentare il 10% - 20% degli errori nelle previsioni del fabbisogno energetico per gli edifici reali (sebbene molti dei programmi usati fossero già stati corretti dagli errori riscontrati con gli esercizi E100-E200).

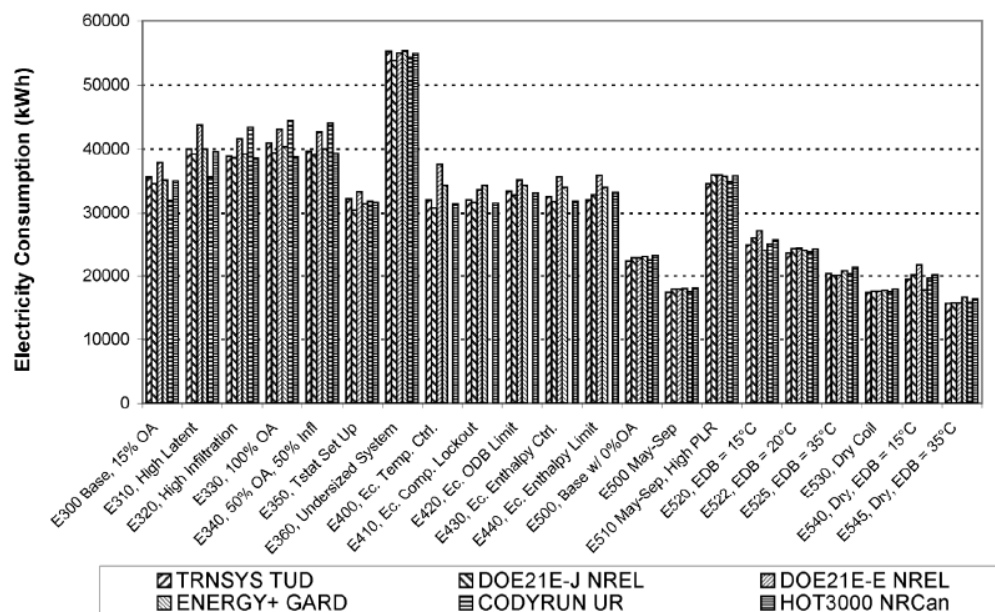


Figura 46 - HVAC BESTEST: totale consumo elettrico, prima della diagnostica BESTEST
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)

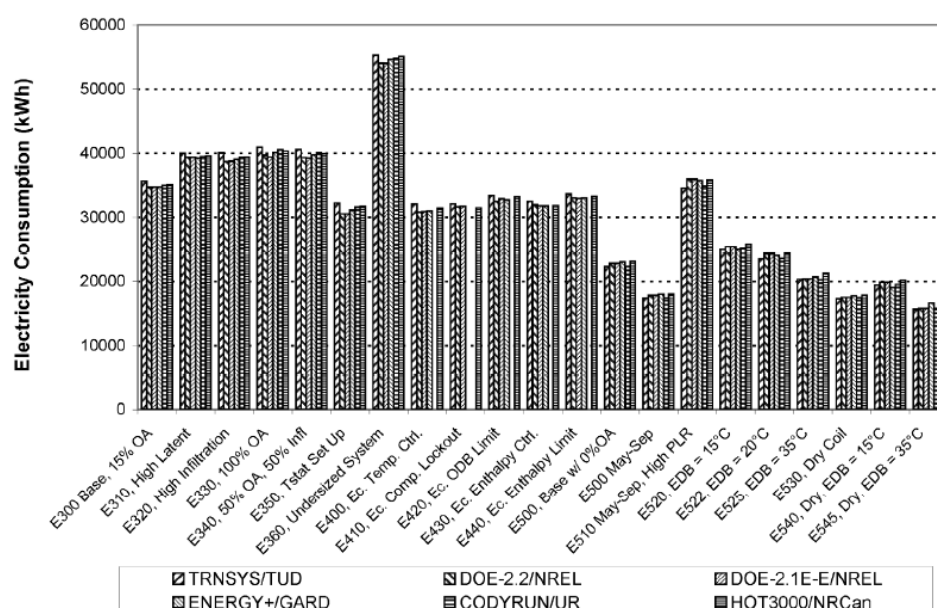


Figura 47 - HVAC BESTEST: totale consumo elettrico, dopo la diagnostica BESTEST
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)

4.3.4.2 Bugs riscontrati nei software analizzati

I risultati ottenuti con i programmi di simulazione utilizzati in questo report sono rivolti alla valutazione di altri strumenti di simulazione dettagliata o semplificata delle previsioni sul fabbisogno energetico del sistema edificio-impianto. L'esperienza collettiva del gruppo di esperti IEA ha dimostrato che quando un programma mostra importanti differenze con i risultati esposti nella *Part III* della relazione tecnica completa, la causa è di solito un bug, un algoritmo difettoso, o un problema nella documentazione.

Durante le prove dei casi E300-E545, la metodologia diagnostica HVAC BESTEST è riuscita ad evidenziare questi problemi in tutti i programmi di simulazione energetica analizzati. Gli esempi più significativi per ciascun programma sono elencati di seguito (in ordine alfabetico per nome del programma), mentre una lista di 21 problemi riscontrati tra i programmi testati è disponibile in Tabella 25.

CODYRUN. Isolamento e correzione dei problemi relativi sia all'incoerente computazione del calore assorbito dall'aria che alla mappatura delle prestazioni della rete neurale per condizioni senza deumidificazione. Questo causava una sottovalutazione del 14% sulle stime del consumo energetico annuo del compressore, e le stime sul picco erano sottovalutate del 9%. (CODYRUN è un programma di simulazione oraria dettagliato patrocinato dall'università Università di Reunion Island, Francia.)

DOE-2.1E ESTSC version. Isolamento di documentazione fuorviante relativa alla regolazione del fattore di by-pass in funzione del rapporto di carico (PLR). Questo comportava una sopravvalutazione del carico latente allo scambiatore e del totale fabbisogno energetico del 30% - 115% e del 7% - 22% rispettivamente, nei casi con funzionamento continuo e con carichi parziali medi (mid-PLR). (Fino a poco tempo fa, DOE-2 è stato il principale software di analisi energetica sponsorizzato dal dipartimento di energia statunitense (Department Of Energy); molti dei suoi algoritmi sono stati incorporati in EnergyPlus.)

DOE-2.2. Isolamento e correzione di un errore relativo al calcolo della temperatura a bulbo bagnato in ingresso (EWB). Questo provocava una sovrastima del 20% - 50% sul picco orario del carico latente dello scambiatore nei casi ad elevato rapporto di aria esterna. (DOE-2.2 è basato su DOE-2.1E, con ulteriori sviluppi da parte di James J. Hirsch & Associates.)

EnergyPlus. Isolamento e correzione di un errore relativo al calcolo della temperatura di raffreddamento in uscita dalla batteria alettata e il rapporto di umidità durante il funzionamento a secco dello scambiatore. Questo portava al non funzionamento dell'apparecchiatura HVAC in determinate ore della giornata; ciò influenzava il fabbisogno energetico annuo sia del compressore che del ventilatore (lato condensatore) e un consumo di picco orario discordante del 1% - 2% nei casi E300-E360. (DOE ha recentemente rilasciato EnergyPlus che costituisce il suo programma di simulazione energetica dettagliata di prossima generazione.)

HOT3000. Isolamento e correzione di un errore relativo alla modellazione dell'aria esterna. Questo produceva una sottostima del 4% sul fabbisogno totale, una sottovalutazione del 5% del carico sensibile della batteria alettata, e una sottostima del 9% del carico latente allo scambiatore nel caso con il 100% di aria esterna. (HOT3000 è sviluppato e mantenuto da CANMET Energy Technology

Centre at Natural Resources Canada, è una versione modificata di ESP-r autorizzata dall'università di Strathclyde, in Scozia (UK), che mantiene lo stesso approccio di modellazione di ESP-r ma include alcuni nuovi modelli, come quelli per le attrezzature di raffreddamento dedicate a singole zone.)

Software	Error Description ^A	% Disagreement ^{A,B}	Resolution
CODYRUN	Inconsistent accounting of fan heat (main issue), and dry-coil modeling in neural network performance mapping	14% compressor consumption 9% peak power (E300, E310)	Fixed
CODYRUN	Moisture balance calculation	1% compressor consumption (E360) 4%–5% peak power (E360,E300–E320)	Fixed
CODYRUN	IDB does not float above set point when equipment is overloaded	14% compr. consumption (E320–E340) 1% compressor consumption. (other E3xx) 0%–1% peak power (E300 series)	Fixed
CODYRUN	Thermal balance calculation, amalgamation of air infiltration and outside air mixing, and thermal capacitance input error	Up to 4% total consumption Up to 3% peak consumption	Fixed
CODYRUN	CDF/PLR not properly accounted for in indoor and outdoor fan consumptions	8%–18% indoor and outdoor fan consumption 1%–3% total consumption (E500–E525)	Fixed
CODYRUN	Neural network performance calculation	21% peak-hour sensible load (E360) 1% total consumption (E360)	Fixed
CODYRUN	Balancing of zone air conditions and equipment performance parameters	36%–53% peak latent coil load 2%–6,5% peak consumption (E520, E522)	Fixed
DOE-2,1E-ESTSC	Misleading documentation for BF = f(PLR) curve, affects cases with continuous fan operation and typical range of PLRs	30%–115% latent coil loads 7%–22% total consumption (E300–E350, E400–E440)	Authors notified, input fixed
DOE-2,1E-ESTSC	Hard-wired lower limit on EWB used with performance data	65%–109% fan consumption 6%–8% total consumption (low EDB E520, E540 only)	Fixed
DOE-2,1E-ESTSC	Single-pass HVAC calculation with 1-hour time step	20%–50% peak latent coil load (E320–E340, E400); 20%–80% peak humidity (E310, E350, E545)	No change, fixed in EnergyPlus
DOE-2,1E-ESTSC	Variation of zone humidity ratio in dry-coil cases with constant set point and cooling on	10%–25% daily humidity ratio (E530 specific day results)	No change, fixed in EnergyPlus
DOE-2,2	Incorrect entering wet-bulb temperature for high outside air with abrupt changes in conditions	20%–50% peak latent coil loads (E330, E340, E400) 1,0% total consumption (E340)	Fixed
DOE-2,2	Possible incorrect entering wet-bulb temperature for high infiltration air with abrupt changes in conditions	20%–50% peak latent coil loads (E320, E340)	Authors notified
ENERGYPLUS	Documentation improvement for when performance data for ARI rating conditions not included	Possible fatal error ^C	Fixed
ENERGYPLUS	Latent cooling load calculation	Negligible	Fixed
ENERGYPLUS	System control during part loading	1%–2% consumption ^D and total peak power (E300 series)	Fixed

ENERGYPLUS	Weather data interpolation with subhourly time steps	0%–1% consumption ^D (E300 series) 0%–2% total peak power (E300 series)	Fixed
ENERGYPLUS	Economizer compressor lockout allowed as input, but not implemented in the software	E410 gives same results as E400	Authors notified
ENERGYPLUS	Moisture balance	8%–32% humidity ratio (E500-E525); negligible consumption	Fixed
HOT3000	Outside air not properly modeled	4% total consumption, 5% sensible coil, 9% latent coil (E330 only)	Fixed
HOT3000	System performance parameters based on zone conditions from previous time step	3% peak consumption (E310, E520 only)	Authors notified

^A Acronyms and abbreviation: BF= Bypass Factor; CDF = COP Degradation Factor; IDB = Indoor Dry Bulb temperature; EWB = Entering Wet Bulb temperature; PLR = Part Load Ratio.
^B Specific cases or conditions relevant to the described disagreement(s) are included in parentheses.
^C Fatal error occurs if ARI-condition data point is not used for curve fit normalization.
^D Compressor + OD fan.

Tabella 25 - HVAC BESTEST: panoramica sui bug individuati e corretti, casi E300-E545
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)

4.3.4.3 Diagrammi diagnostici

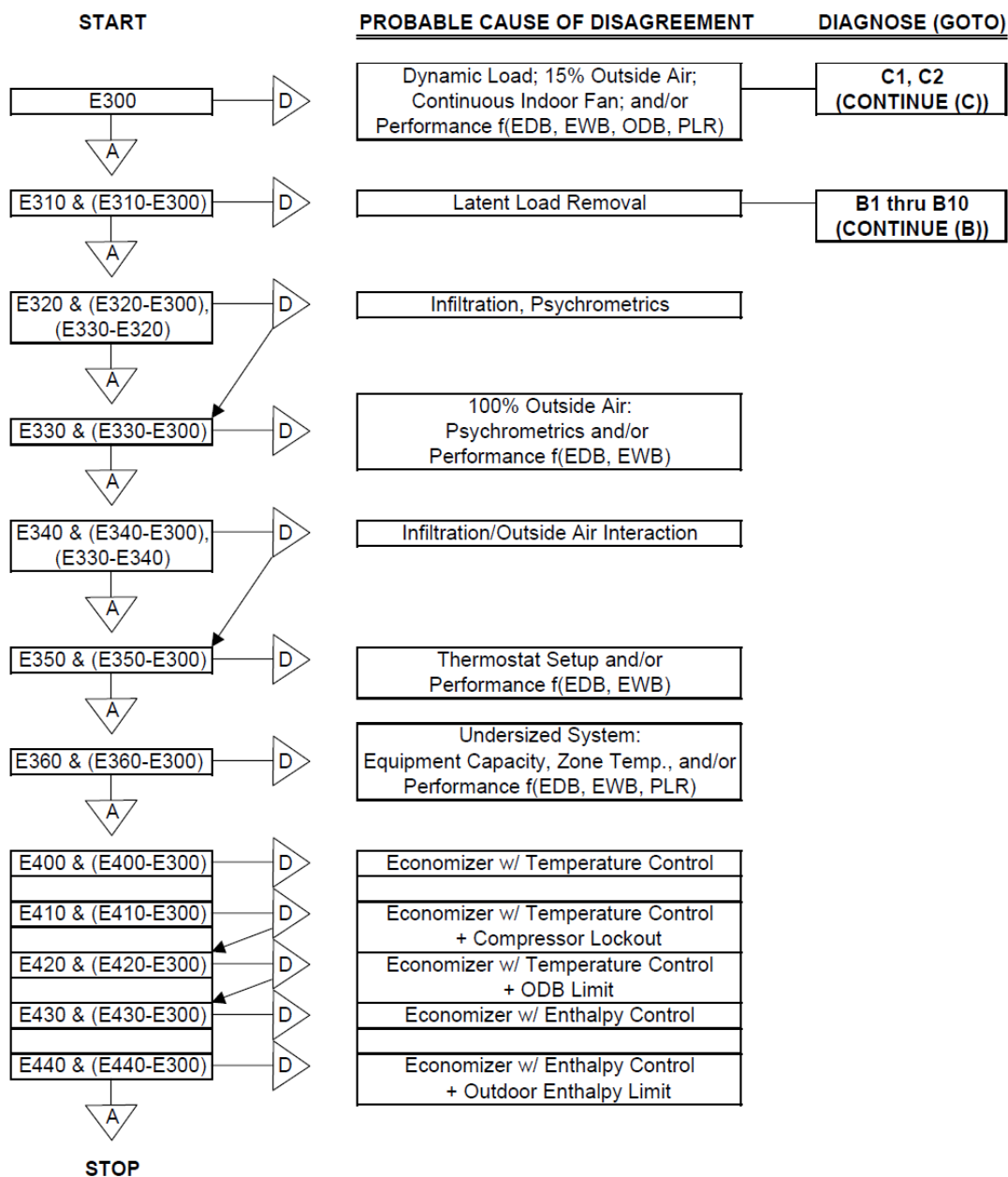
Analogamente ad ogni procedura BESTEST, la relazione tecnica completa è corredata di un diagramma diagnostico utile per la definizione dello scopo e dell'ordine con cui eseguire i vari test.

Onde evitare inutili ripetizioni di quanto già esposto precedentemente, ci limitiamo a ribadire i seguenti concetti base:

- I diagrammi forniscono un'indicazione sulla probabile causa di eventuali anomalie tra i risultati, in quanto ogni caso test è mirato a stressare algoritmi di calcolo specifici.
- I test indicati, ad esempio, con “E310-E300” suggeriscono il confronto (di sensibilità) tra i risultati del caso E310 con quelli del caso E300. In particolare si deve porre particolare attenzione all'intensità della differenza tra i due risultati (*delta results*) ed il loro segno.
- Se un software mostra delle difformità con i risultati di riferimento, in primo luogo si consiglia di controllare la correttezza di tutti i dati input.
- L'utilizzo dei diagrammi diagnostici aiuta ad isolare le fonti di discrepanza; in taluni casi è utile ricontrollare i risultati della serie E100. Qualora non si siano individuati errori nei dati di input, si prosegue la ricerca del problema nel codice sorgente, se si trova un errore allora si provvede alla sua correzione e alla ripetizione del caso test.
- Se in un'ottica ingegneristica, il disaccordo è causato da una differenza ragionevole tra i risultati degli algoritmi testati e quelli di riferimento, allora si può proseguire con il successivo caso di prova.
- I percorsi alternativi (es. doppia freccia come nei casi E410, E420) indicano la possibilità di passare oltre in quanto eventuali problemi riscontrati non pregiudicano l'efficacia dei test successivi.
- Nelle operazioni di confronto tra i risultati del software in esame con quelli di riferimento, risultano molto utili i file (in formato excel) allegati al report completo.

Esempio pratico

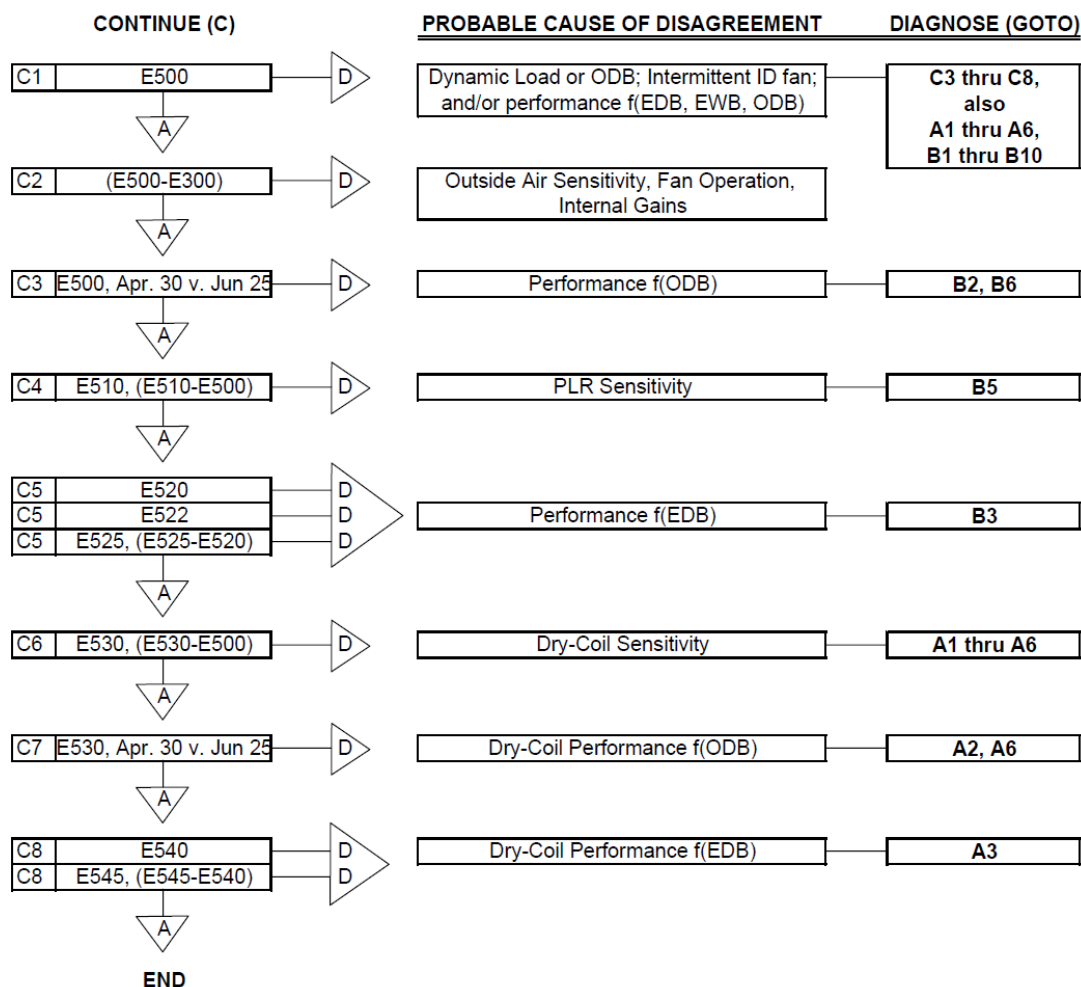
Un programma mostra discordanze col caso E300. Visto che questo è il caso di base per la serie E300, la Figura 48 suggerisce una serie di potenziali fonti di discrepanze tra gli algoritmi includendo la variazione dinamica del carico, il 15% d'aria esterna (miscelata con aria di ritorno), funzionamento continuo del ventilatore interno, o prestazioni dinamiche (su base oraria) delle apparecchiature come $f(\text{EDB}, \text{EWB}, \text{ODB}, \text{PLR})$. L'utente viene indirizzato ad eseguire la diagnostica C1 e C2. Se il disaccordo persiste con C1 e/o C2, queste eliminano, tra le cause del problema, la miscelazione dell'aria esterna e il funzionamento in continuo del ventilatore. L'utente è quindi indirizzato a ricontrollare i risultati provenienti dai casi E100-E200 (cfr. Figura 43). Se i risultati E100 sono ancora soddisfacenti, allora il problema è probabilmente isolato alla mappa dei parametri prestazionali che sono funzione $f(\text{ODB}, \text{EWB}, \text{EDB})$ e quindi sensibili all'estesa quantità di dati prestazionali, oppure si dovranno ricercare altri problemi relativi alla modellazione dinamica oraria.



ABBREVIATIONS

A = Agree; D = Disagree. For the E300 series, agreement/disagreement is determined relative to example simulation results or other user-provided results and the sensitivity case.

Figura 48 - HVAC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi in regime dinamico (300-E440)
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)



ABBREVIATIONS

A = Agree; D = Disagree. For the E300 series, agreement/disagreement is determined relative to example simulation results or other user-provided results and the sensitivity case.

Figura 49 - HVAC BESTEST: diagramma diagnostico per i casi in regime dinamico (E500-E545)
(Fonte: Neymark e Judkoff, 2004)

4.3.5 IEA RADTEST

Gli impianti di riscaldamento e/o raffrescamento radiante sono conosciuti in tutto il mondo. Esistono diverse tipologie di questi impianti tuttavia, il più noto e realizzato è quello a pavimento. Questo tipo di impianto si compone di un circuito immerso nello strato di cemento del pavimento, la trasmissione del calore dal circuito dove scorre il fluido termovettore verso l'ambiente, risulta ritardata a causa della consistente massa termica, e la temperatura superficiale risulta inferiore conseguentemente alla resistenza termica dello strato cementizio. Questo comportamento crea un clima assai confortevole all'interno degli ambienti e probabilmente questa è una delle ragioni che portano a questo largo impiego. I sistemi di raffrescamento si ottengono solitamente con pannelli radianti a soffitto, tuttavia non sono rari impianti a pavimento adottati sia per il raffrescamento estivo che per il riscaldamento invernale.

Per tener conto del comportamento degli impianti di riscaldamento e raffrescamento radiante nei programmi di simulazione dinamica, sono disponibili specifici modelli o metodi di modellazione. A seconda del livello di dettaglio del programma specifico e del metodo di calcolo, i circuiti ad acqua possono essere facilmente aggiunti agli elementi da costruzione, o se vi è la necessità di astrazione, ad esempio si possono introdurre sotto forma di strati con una temperatura che può essere impostata su un modello operativo predefinito.

Alcuni di questi metodi sono ben conosciuti e vengono utilizzati frequentemente, ma vi è la necessità di convalidare questi modelli per aumentare la fiducia nel loro utilizzo.

Il report che andremo a presentare descrive i test per gli impianti di riscaldamento e raffrescamento radiante (RADTEST) proposti dall'IEA-SHC Task 22 Subtask C. Similmente a tutti i lavori dell'IEA, lo scopo del documento è quello di fornire una serie di casi test non ambigui per la diagnostica e il confronto tra software. Non tutti i programmi richiedono gli stessi dati di input, pertanto si è cercato di fare una descrizione che permetta l'utilizzo di più software.

Il documento dapprima presenta la procedura di test, successivamente raccoglie e commenta i risultati ottenuti coi software di simulazioni presi a riferimento. La procedura è divisa in due parti:

- Parte I) viene usato un metodo semplificato con uno strato a temperatura costante;
- Parte II) viene usato un modello dettagliato di impianto ad acqua.

Casi semplificati

La raccolta RADTEST contiene in tutto 14 prove di validazione, partendo dal caso 800 fino al caso 2810. La procedura si sviluppa in maniera sequenziale, ovvero i vari casi si ottengono introducendo piccole modifiche dall'esercizio precedente. Il caso 800 schematizza una singola zona rettangolare ad elevata massa termica, due "finestre opache" (che sono delle pareti altamente conduttive di massa trascurabile e non hanno alcuna trasmittanza di radiazione solare), ed è assente l'accoppiamento col terreno. A questo stadio, lo spazio da modellare corrisponde al caso 800 dell'ENVELOPE BESTEST [10]. La spiegazione di questo caso, è che l'utente ha a disposizione un modello di riferimento per il suo algoritmo di calcolo. Se qualche risultato fallisce in questa fase, l'utente dovrebbe prima eseguire i casi diagnostici dell'ENVELOPE BESTEST (cfr par. 4.3.1).

Dato che i sistemi radianti sono spesso inseriti in elementi da costruzione, di solito le parti emettono calore verso due zone situate su entrambi i lati dell'elemento, anche se non previsto.

Pertanto, doveva essere aggiunta una seconda zona in tutte le prove successive. Una zona fortemente isolata quasi adiabatica, circondata da terra è inserita sotto la zona primaria, come mostrato nella Figura 50.

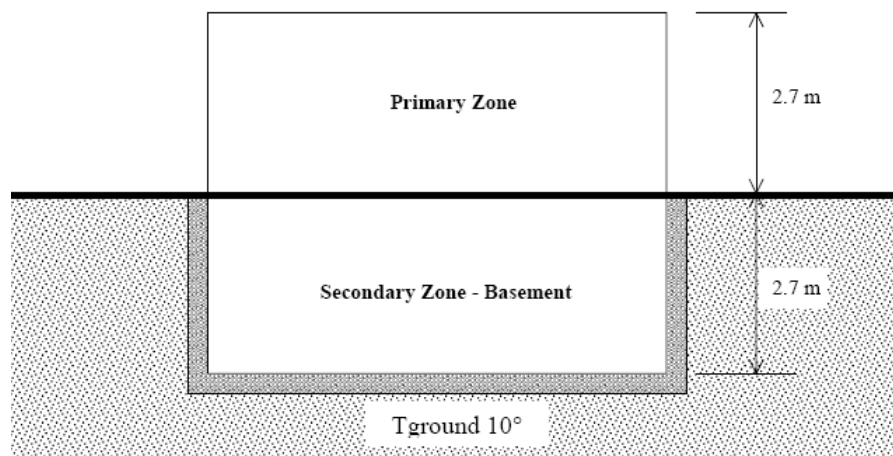


Figura 50 - RADTEST: vista in sezione dell'edificio di riferimento

Dal caso 1800 al 1820, al fine di eliminare ulteriormente l'influenza del clima esterno rispetto al caso base 800, anche la zona attiva viene rappresentata come una zona fortemente isolata. Nei casi 1800 e 1805 viene osservato il flusso di calore tra le due zone. Dal caso 1810 in avanti, uno strato a temperatura costante è disposto al centro degli elementi costruttivi del pavimento. Questo rappresenta, in forma semplificata, l'impianto radiante la cui temperatura è mantenuta ad un valore costante che varia solo stagionalmente (40°C 24 ore/giorno dal 1 Ottobre al 30 Aprile, 20°C 24 ore/giorno dal 1 Maggio al 30 Settembre). Nel caso 1830 viene rimosso l'isolamento dall'involucro edilizio della zona primaria e, ad ogni test successivo, nella struttura viene introdotta prima una finestra opaca (caso 1840) che sarà successivamente sostituita con una finestra reale (caso 1850 e seguenti).

La scelta del metodo più appropriato per la modellazione di questi casi test è lasciata all'utente, il quale dovrà procedere diversamente a seconda delle caratteristiche del software in esame. Lo scambio di calore dallo strato a temperatura costante verso la zona attiva viene osservato in dettaglio, la potenza e il fabbisogno energetico sono i parametri osservati in tutti i casi test. Il controllo della temperatura nella zona primaria viene realizzato con un impianto di riscaldamento e/o raffrescamento separato, ideale, puramente convettivo con setpoint costante. Questo significa che per controllare la zona attiva non viene usato il sistema radiante stesso, ma certamente questo impianto influenza il bilancio energetico dell'ambiente climatizzato. Gli impianti reali di questo tipo sono spesso progettati per funzionare su uno schema predefinito, piuttosto che su un sistema di controllo collegato alle condizioni dell'ambiente da climatizzare, in quanto è spesso impossibile a causa della forte inerzia termica. Tuttavia, il secondo impianto inserito in questo modello può essere che manchi nella pratica costruttiva, quando le oscillazioni della temperatura della stanza ricadono in un intervallo accettabile (la verifica di questo aspetto è uno dei compiti dei programmi di simulazione a cui mirano questi test).

Il sistema radiante è lasciato invariato in tutti i casi dal 1810 al 1870, le modifiche vengono eseguite sui carichi interni e sull'ambiente da simulare al fine di analizzarne la risposta in combinazione con l'impianto radiante. L'obiettivo dei vari casi test si può vedere in Tabella 26, mentre in Tabella 27 si possono individuare più in dettaglio come variano i dati di input tra i vari casi.

Negli ultimi casi, 1880 e 1890, vengono analizzate differenti strategie di controllo con differenti setpoint e diverse programmazioni.

Casi dettagliati

I casi dettagliati (casi 2800 e 2810) contengono la descrizione di un reale impianto di riscaldamento a pavimento (vedi Figura 51). A questo punto, all'utente è consigliato di modellare questo impianto nel modo più dettagliato che il software permetta. L'obiettivo di questo caso test è da un lato confrontare i risultati dettagliati con quelli semplificati, e dall'altro comparare i differenti approcci di modellazione.

I due casi differiscono solamente nella programmazione dei periodi di funzionamento come riassunto in Tabella 26 e Tabella 27.

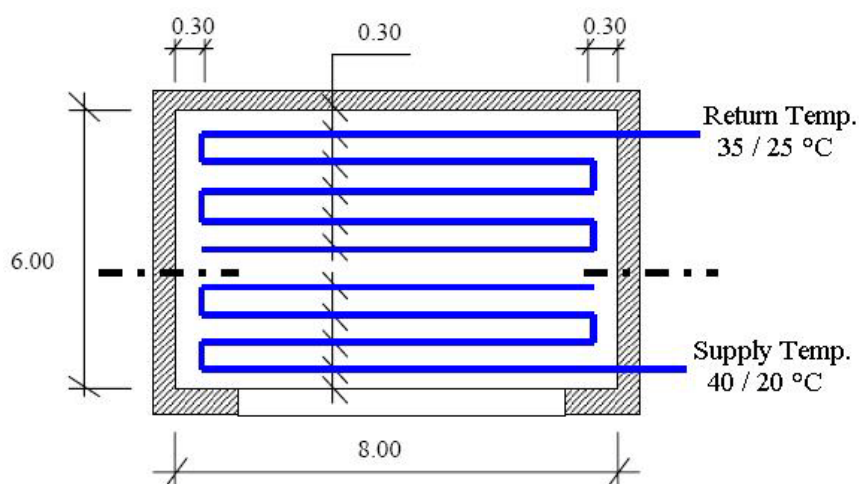
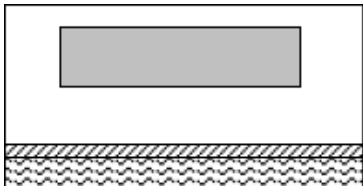
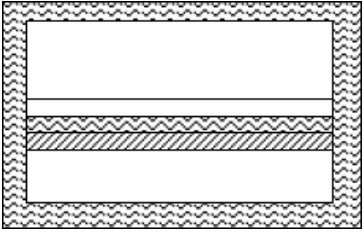
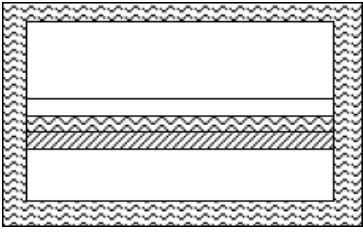
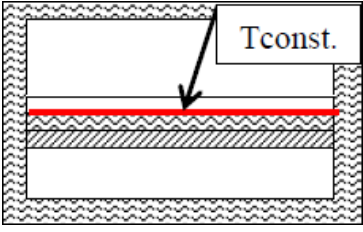
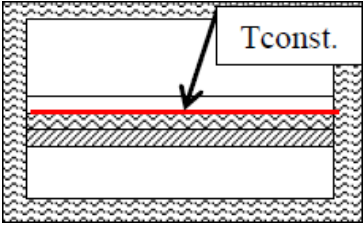
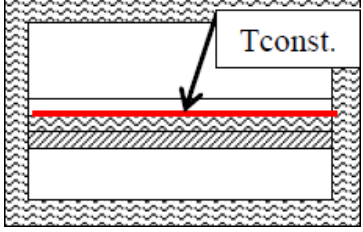
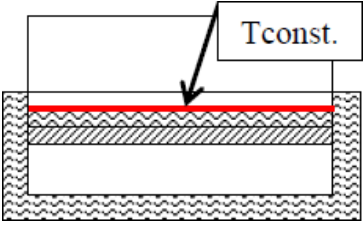
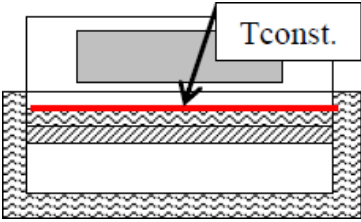
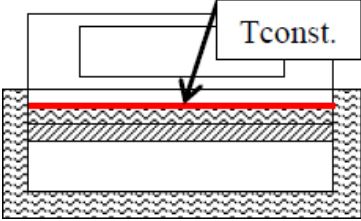
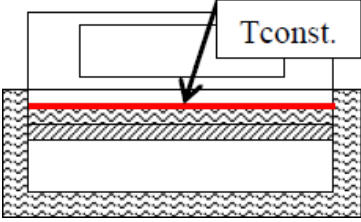
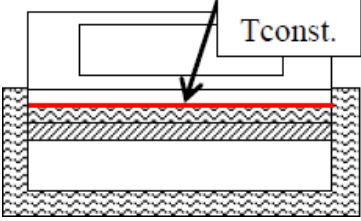
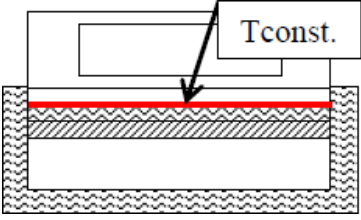
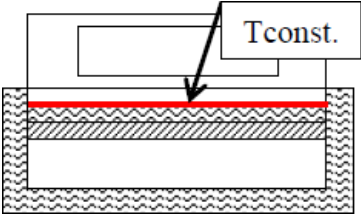


Figura 51 - RADTEST: geometria dettagliata dell'impianto radiante

Caso n°	Schema grafico	Descrizione	Scopo
800		Corrisponde al caso 800 dell'ENVELOPE BESTEST. Un edificio ad elevata massa termica con una finestra opaca. Pavimento adiabatico con capacità di immagazzinamento del calore.	Caso base

1800		Modello a due zone completamente isolato. - infiltrazione assente - carichi interni assenti	Trasmissione del calore attraverso gli elementi da costruzione interni
1805		Modello a due zone completamente isolato. - infiltrazione ACH = 1.0 l/h carichi interni 200 W dal 1 Maggio al 30 Settembre (puramente convettivi)	Presenza di carichi interni
1810		Superficie a temperatura costante tra lo strato di cemento e quello isolante. Coefficiente superficiale sul pavimento puramente convettivo.	Modello convettivo
1815		Rimpiazzare il coefficiente superficiale puramente convettivo con un coefficiente combinato. Radiazione dal pavimento verso il soffitto 100%	Modello radiativo
1820		Normale distribuzione della radiazione verso tutte le superfici.	Distribuzione della radiazione
1830		Costruzioni reali per pareti e tetto. Carichi interni puramente convettivi 365 giorni/anno. ACH = 0.5 l/h	Carichi interni di zona più realistici

1840		Viene aggiunta una “finestra opaca”. Carichi interni impostati come il caso 800.	Influenza di pareti altamente conduttive
1850		Viene introdotta una finestra reale.	Influenza della radiazione entrante dall'esterno
1860		Coincide col caso 1850, ma i carichi interni sono solo radianti.	Influenza di sorgenti di calore radiante
1870		Coincide col caso 1850, ma i carichi interni sono solo convettivi.	Influenza di sorgenti di calore convettive.
1880		Livello inferiore della superficie a temperatura costante. Setpoint: 18°C d'estate, 30°C d'inverno.	Influenza del cambiamento di temperature sul fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento
1890		Simile al caso 1850, ma nel periodo estivo il setpoint della superficie a temperatura costante è attivo solo dalle 20.00 alle 6.00.	Influenza di operazioni interrotte sul fabbisogno energetico per il raffrescamento.

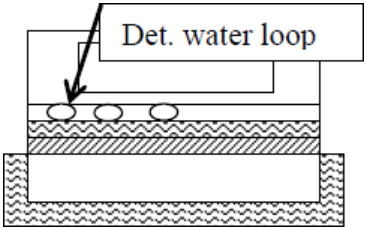
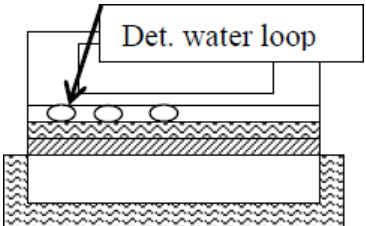
2800		Caso reale con un modello dettagliato di un circuito alimentato ad acqua. Alimentazione della portata d'acqua per l'intero anno 24 h/giorno.	-
2810		Caso reale con un modello dettagliato di un circuito alimentato ad acqua. Nella stagione estiva, la portata d'acqua viene inviata solo dalle 20.00 alle 6.00-	-

Tabella 26 - RADTEST: descrizione qualitativa dei casi test (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)

Case	Setpoint H, C	INTGEN			ACH INFIL	INT IR EMISS	EXT IR EMISS	INT SW ABSORP	EXT SW ABSORP	GLASS m ² / ORIENT	CONS	LAYER			SHED h	NEXT TO
800	20, 27	200	0.6	0.4	0.5	0.9	0.9	NA	0.6	HC-W / S	AD	NA	NA	NA	NA	AD
1800	20, 27	0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	NA	0.6	0	3L	Mid	NA	NA	NA	BA
1805	20, 27	200	0.0	1.0	1.0	0.9	0.9	NA	0.6	0	3L	Mid	NA	NA	NA	BA
1810	20, 27	200	0.0	1.0	1.0	0.9	0.9	NA	0.6	0	3L	Mid	40 / 20	24	24	BA
1815	20, 27	200	0.0	1.0	1.0	0.9	0.9	NA	0.6	0	3L	Mid	40 / 20	24	24	BA
1820	20, 27	200	0.0	1.0	1.0	0.9	0.9	NA	0.6	0	3L	Mid	40 / 20	24	24	BA
1830	20, 27	200	0.0	1.0	0.5	0.9	0.9	NA	0.6	0	3L	Mid	40 / 20	24	24	BA
1840	20, 27	200	0.6	0.4	0.5	0.9	0.9	0.6	0.6	HC-W / S	3L	Mid	40 / 20	24	24	BA
1850	20, 27	200	0.6	0.4	0.5	0.9	0.9	0.6	0.6	12 / S	3L	Mid	40 / 20	24	24	BA
1860	20, 27	200	1.0	0.0	0.5	0.9	0.9	0.6	0.6	12 / S	3L	Mid	40 / 20	24	24	BA
1870	20, 27	200	0.0	1.0	0.5	0.9	0.9	0.6	0.6	12 / S	3L	Mid	40 / 20	24	24	BA
1880	20, 27	200	0.6	0.4	0.5	0.9	0.9	NA	0.6	12 / S	3L	Mid	30 / 18	24	24	BA
1890	20, 27	200	0.6	0.4	0.5	0.9	0.9	NA	0.6	12 / S	3L	Mid	40 / 20	24/10	24/10	BA
2800	20, 27	200	0.6	0.4	0.5	0.9	0.9	0.6	0.6	12 / S	3L	Mid	40 / 20	24	24	BA
2810	20, 27	200	0.6	0.4	0.5	0.9	0.9	0.6	0.6	12 / S	3L	Mid	40 / 20	24/10	24/10	BA

Abbreviations:

H, C	Heating and Cooling
INTGEN	Internal gains
ACH INFIL	Air changes per hour infiltration
INT / EXT IR EMISS	Internal /external infrared emissivity
INT / EXT SW ABSORP	Internal/external short-wave absorption
ORIENT	Orientation S = south
HC-W / S	Highly conductive wall / south
NA	Not Active. No input value required

LAYER	Active temperature layer
- CONS	Floor construction AD= adiabatic, 1L = 1layer, 3L = 3 layers
- LOC	Location of active layer
- TEMP	Temperature of active layer
SCHED	Schedule of active layer
NEXT TO	Boundary from the floor of active zone
	AD = Adiabatic floor, BA = Basement

Tabella 27 - RADTEST: descrizione dei casi test (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)

4.3.5.1 Output di riferimento

I partecipanti al progetto IEA-SHC Task 22 hanno prodotto una serie di risultati di riferimento che sono inclusi nella seconda parte del report esposto in questo paragrafo. Questi risultati sono stati raccolti, in una prima fase, in forma chiusa ovvero gli incaricati alla modellazione delle varie prove non conoscevano i risultati degli altri programmi, e pertanto non potevano confrontarli tra loro. Questa è una buona soluzione per migliorare le specifiche dei vari casi test. Concorde con i risultati della prima fase, sono stati individuati, e successivamente corretti, alcuni errori nelle specifiche dei vari test. In una seconda fase, le ovvie discordanze tra i risultati dei vari programmi sono state discusse e migliorate mentre in alcuni casi si rese necessaria una terza fase dove si è provveduto all'individuazione e correzione di alcuni bug o revisione di alcune erronee interpretazioni delle specifiche dei vari test. Bugs ed errori di modellazione sono stati riportati, per ogni software, in un "modeler report" anch'esso incluso nella trattazione originale.

I risultati finali ricavati dai programmi di riferimento (TRNSYS; DOE 2.1E; IDA-ICE 3.0; CLIM 2000; ESP-r/HOT3000) sono presentati in forma tabellare e grafica. Si vuol ora ribadire che questi risultati non rappresentano uno standard di verità assoluta. Per ogni caso test, se un programma cade nella mezzeria dell'intervallo non significa che sia migliore di altri che invece cadono agli estremi o addirittura esternamente. I range rappresentano le differenze tra gli algoritmi considerati come i più rappresentativi dello stato dell'arte attuale (2003). L'investigazione delle sorgenti di queste differenze è vivamente consigliato, tuttavia l'esistenza di una difformità non significa necessariamente che il software sia sbagliato. L'esperienza ha dimostrato che quando alcuni software mostrano differenze considerevoli con un range di riferimento, spesso hanno individuato un bug nel codice di calcolo, o comunque un algoritmo discutibile.

Il confronto col precedente ENVELOPE BESTEST non viene riportato in quanto tutti i risultati erano all'interno del range.

I diversi approcci di modellazione degli impianti di riscaldamento e raffrescamento radiante hanno prodotto risultati soddisfacenti. Riteniamo importante evidenziare che software come DOE-2.1E, il quale non ha uno speciale algoritmo per l'analisi di impianti radianti, può essere usato e modificato in modo tale da produrre risultati ragionevoli (esclusione fatta per i calcoli della temperatura superficiale).

Ad ogni modo, si ricorda che tutti i programmi selezionati per partecipare a questo progetto, usano lo stesso metodo di calcolo per gli impianti radianti. Gli autori di questo report [27],[29] affermano che l'uso di queste procedure per la stima delle temperature del pavimento e del fabbisogno energetico è ragionevole.

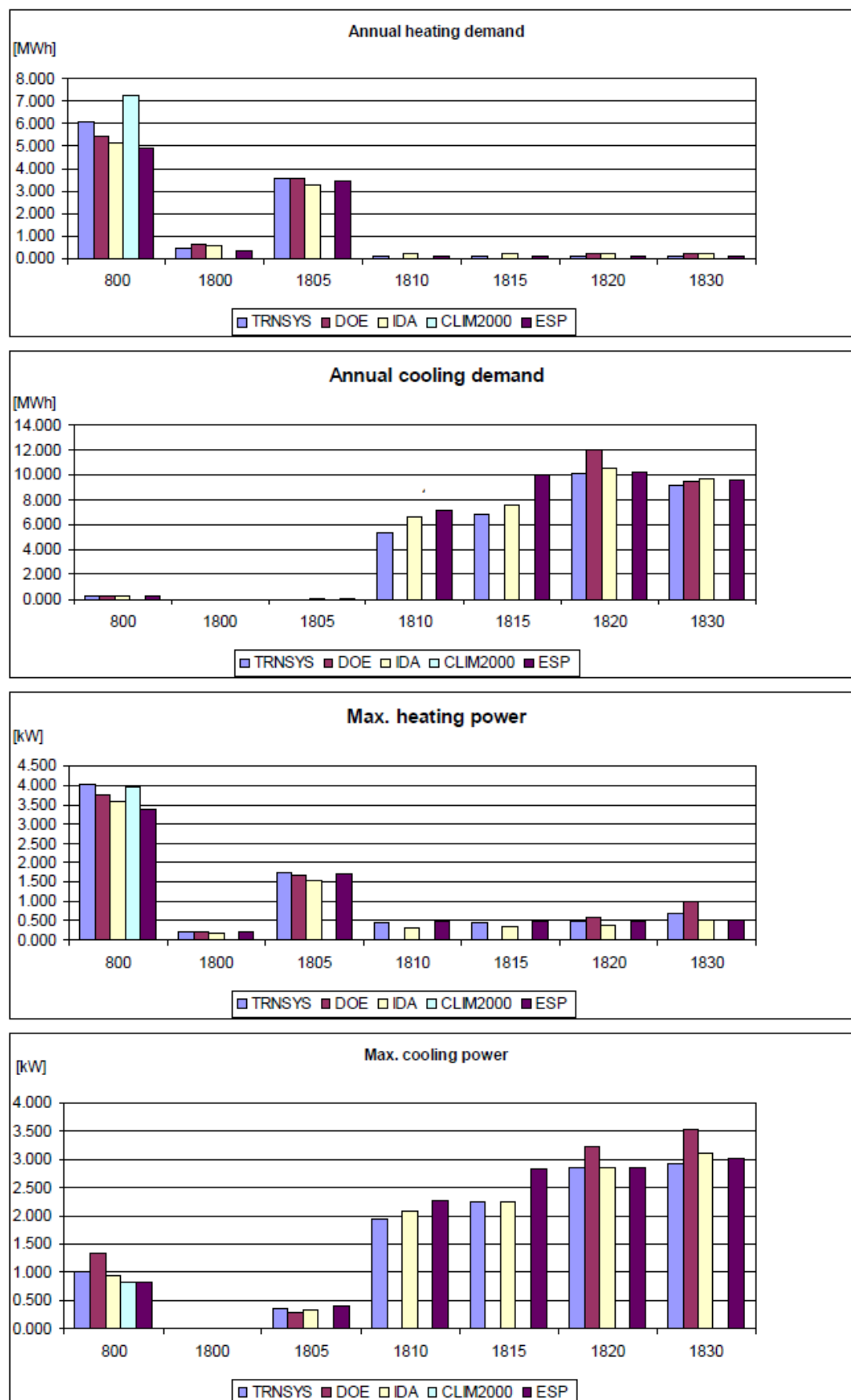


Figura 52 - RADTEST: panoramica dei risultati, casi 800 - 1830 (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)

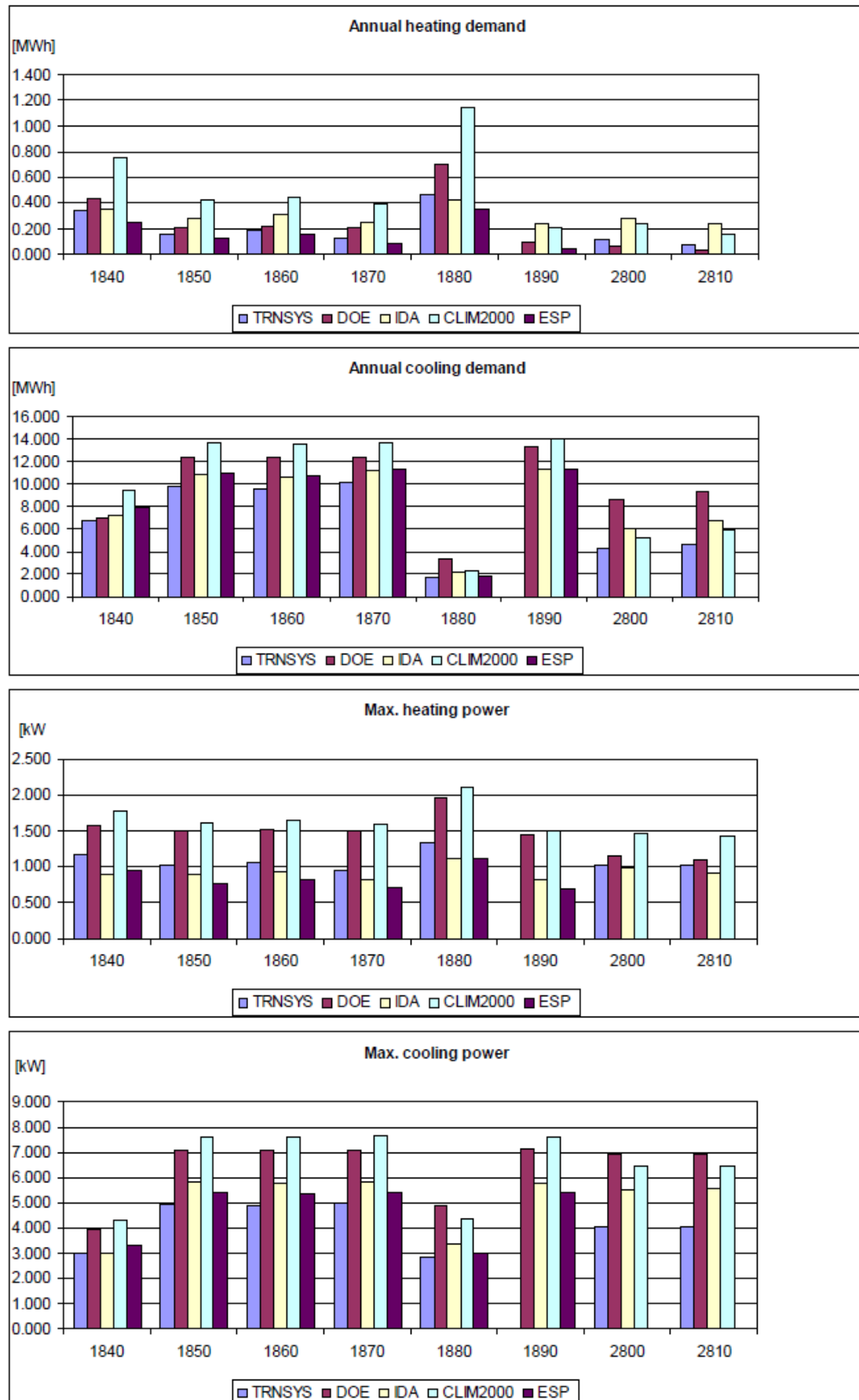


Figura 53 - RADTEST: panoramica dei risultati, casi 1840 - 2810 (Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)

Le figure mostrano una panoramica del fabbisogno energetico e dei carichi di picco sia per il riscaldamento che per il raffrescamento per vari casi differenti.

Come si evince dalle figure, non tutti i casi test sono stati effettuati da tutti i programmi. In alcuni casi, con certi programmi non è possibile fare le necessarie semplificazioni richieste dalle specifiche, ad esempio in DOE-2 la suddivisione radiativo/convettivo del coefficiente del film della superficie interna non può essere influenzata.

Si nota inoltre che la variazione tra i software è considerevole. Si può ancora osservare che le modifiche da un caso all'altro sono abbastanza uniformi, ciò indica che i programmi analizzano correttamente i cambiamenti fisici tra i diversi casi test. Questo si può rendere maggiormente visibile diagrammando le differenze tra i risultati dei test (*delta results*), un esempio coi risultati della temperatura è mostrato in Figura 55. Tuttavia, con questo tipo di grafici si potrebbe sopprimere eventuali errori di tipo sistematico.

La Figura 54 mostra che il programma DOE-2, dal caso 1850 in avanti (sono i casi dove è presente una finestra reale), presenta una differenza sistematica con la temperatura superficiale massima del pavimento. Nella Figura 55, che mostra le differenze aritmetiche tra i risultati per la stessa temperatura della Figura 54, questo fatto è riscontrabile solamente in un punto: DOE-2 mostra uno zero nella differenza tra i casi 1850-1840, dove al contrario tutti gli altri software presentano una variazione di 3 / 4 K.

La Figura 56 rappresenta la temperatura, nel circuito di ritorno, di un caso dettagliato. Dalla stessa si può osservare che, sebbene i vari programmi utilizzino differenti procedure di calcolo, la temperatura dell'acqua di ritorno è tutto sommato uguale durante i periodi di reale funzionamento dell'impianto (dalle 20.00 alle 6.00). Le differenze diventano più significative nei periodi di ferma dell'impianto, comunque queste fasi non hanno effetto sul bilancio energetico dell'impianto.

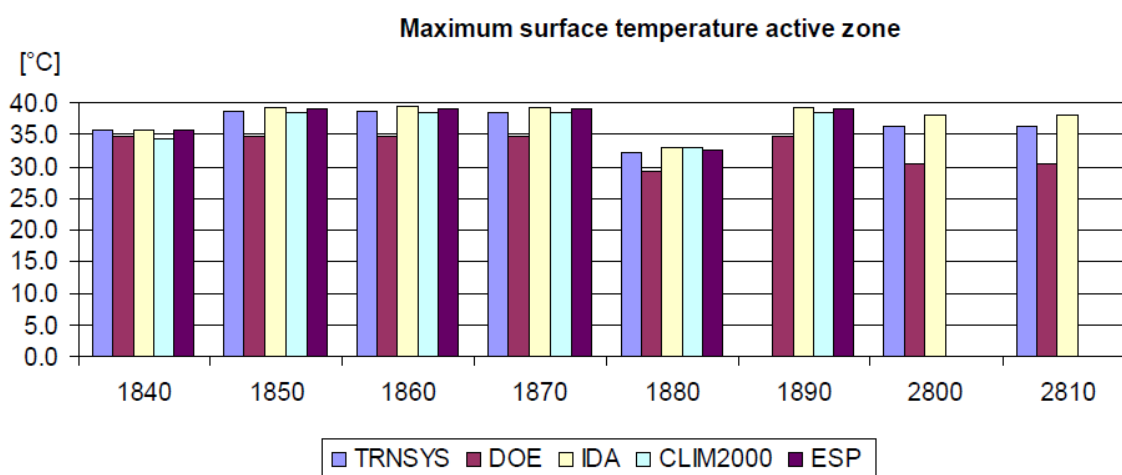


Figura 54 - RADTEST: temperatura massima della superficie radiante, dal caso 1840 al 2810
(Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)

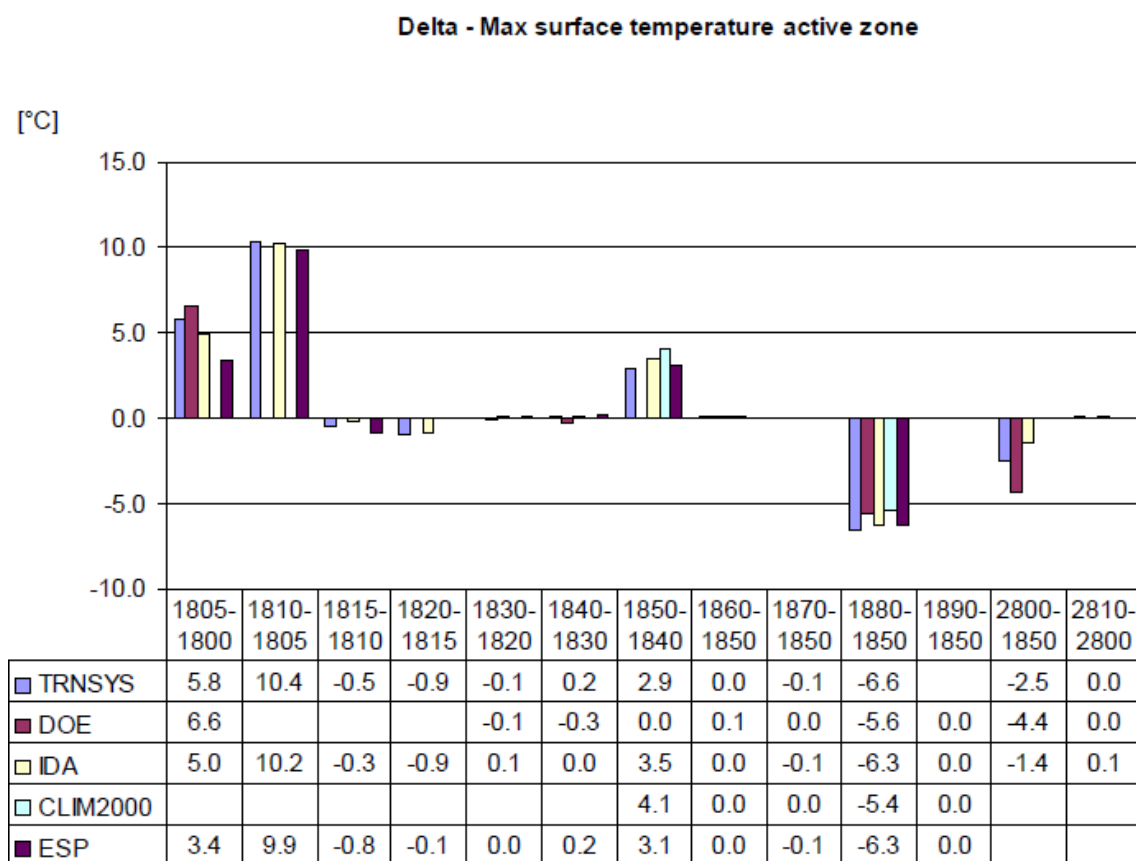


Figura 55 - RADTEST: temperatura massima della superficie radiante, “delta results”
(Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)

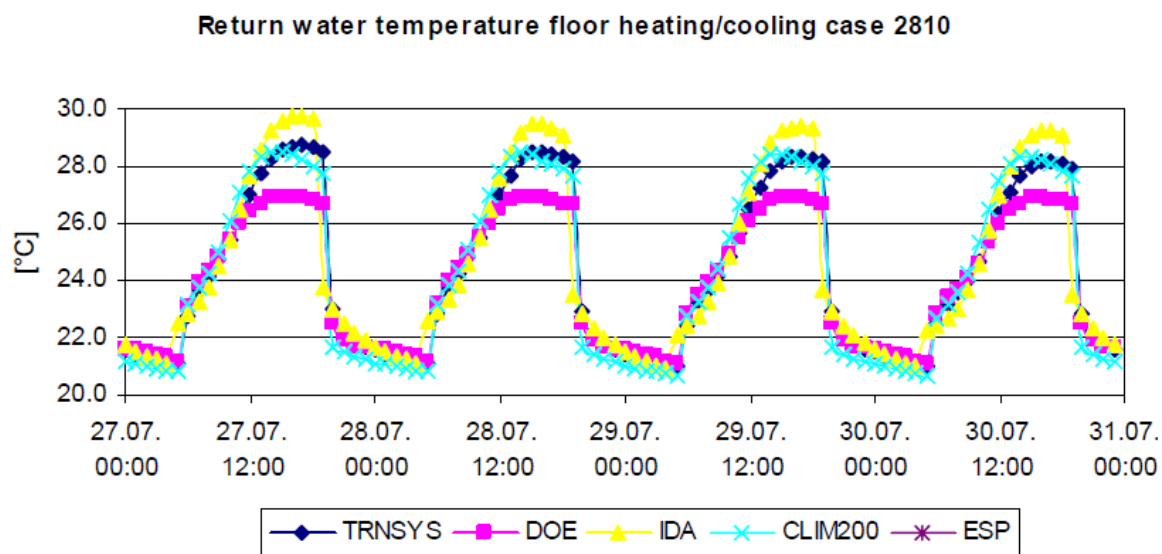


Figura 56 - RADTEST: temperatura dell’acqua di ritorno del circuito, caso dettagliato 2810
(Fonte: Zweifel e Achermann, 2003)

5 CONCLUSIONI

In questa relazione informativa si è potuto osservare come a partire dal 1995 si sia iniziato un laborioso ed efficace studio di verifica degli oramai comuni software di simulazione energetica del sistema edificio-impianto.

La procedura ENVELOPE BESTEST si è focalizzata sulla validazione degli algoritmi basilari di analisi energetica. Da questo studio sono emerse alcune lacune nei software presi a riferimento. Tali problemi sono stati poi individuati e corretti migliorando così l'efficacia di tali strumenti informatici. A conclusione di questo progetto, i partecipanti hanno sottolineato la necessità di ulteriori investigazioni nel campo della validazione, specialmente nei confronti dei modelli di analisi degli impianti HVAC in quanto esclusi da questo lavoro.

Con la procedura HVAC BESTEST si è potuto completare la verifica degli algoritmi fondamentali di modellazione. In questo progetto sono stati individuati e corretti oltre 40 bug nei programmi analizzati. Tali aggiustamenti permettono la convalida degli attuali strumenti di analisi energetica, consentendo così la divulgazione di programmi sempre più precisi e veritieri, e pertanto più facilmente accettati dagli operatori del settore. I partecipanti alla Task 22 dell'IEA-SHC, a conclusione del loro lavoro, hanno suggerito per i successivi studi di validazione di porre particolare enfasi sui seguenti aspetti:

- continuare la produzione di casi test con soluzione analitica
- sviluppare una serie di casi diagnostici che mettono in rilievo fenomeni rilevanti nei grandi edifici commerciali come: la suddivisione in zone, determinazione del rapporto d'aria di infiltrazione, ed altri test sugli impianti di riscaldamento, condizionamento e ventilazione.
- sviluppare un insieme di dati ordinati di alta qualità per la validazione empirica.

L'IEA-SHC Task 34 / ECBCS 43, recentemente conclusasi, nasce proprio da queste necessità. In questa occasione si è avuto modo di analizzare in dettaglio diversi fenomeni di particolare rilevanza dal punto di vista energetico. In particolare tra gli obiettivi della Task 34 ritroviamo:

- sviluppo di procedure BESTEST:
 - BESTEST sul trasferimento di calore verso terra
 - BESTEST sul trasferimento di calore multi zona e ombreggiamento
 - BESTEST sui flussi d'aria, includendo quelli multi zona
- test di validazione empirica:
 - Ombreggiature / luce naturale / iterazioni coi carichi
 - Sistemi meccanici e componenti ad acqua refrigerata e ad acqua calda
 - Edifici con facciate ventilate
- Creare un unico sito internet che incorpori tutti i test di validazione IEA¹⁵, in particolare includendo quelli sviluppati da: SHC Task 12 / ECBCS Annex 21, SHC Task 22, e SHC Task 34 / ECBCS Annex 43.

¹⁵ In [14], Judkoff e Neymark affermano che tale sito sarà disponibile online verso la fine del 2009.

A conclusione di questo progetto, e delle relative subtask, si sono individuati oltre 100 bug, dei quali almeno 80 sono stati corretti come riassunto in tabella .

Progetto	Discordanze		Modelli Testati
	Identificate	Corrette	
Ground Coupled Slab-on-Grade (subtask A)	24	19	9
Multi-Zone Non-Airflow (subtask B1)	48	32	9
Airflow (subtask B2)	1	1	7
Shading / Daylighting / Load Interaction (subtask C)	14	14	7
Mechanical Equipment and Control (subtask D)	10	8	5
Double Skin Facade (subtask E2)	9	6	5
TOTALE IEA-SHC 34 / ECBCS 43	106	80	24*

* molti modelli sono stati testati in differenti subtask

Tabella 28 - Riassunto correzioni dovute all'IEA 34 / 43 (Fonte: Judkoff e Neymark, 2009)

Questo ci permette di affermare che gli attuali software di simulazione energetica possono essere considerati validi entro il range dei test effettuati, ovvero tali programmi se utilizzati consapevolmente forniscono dei risultati più che affidabili. A tal proposito, a modesto parere dell'autore, si dovrebbe incentivarne maggiormente il loro utilizzo, specie negli ambienti professionali invece che accademici, in modo da infondere maggior fiducia nell'impiego di nuove soluzioni impiantistiche piuttosto che nuovi materiali edili o configurazioni architettoniche.

A conferma di tale affermazione riportiamo il diagramma elaborato in seguito alla somministrazione, in forma riservata¹⁶, di un questionario atto all'individuazione delle scelte / requisiti progettuali che portano all'impiego di conoscenze pregresse o di tali applicativi.

¹⁶ Con forma riservata si intende che tale questionario non è stato stilato anonimamente, ma che specifiche informazioni sui lavori eseguiti potevano essere omesse (es. committente, nome dell'opera ...).

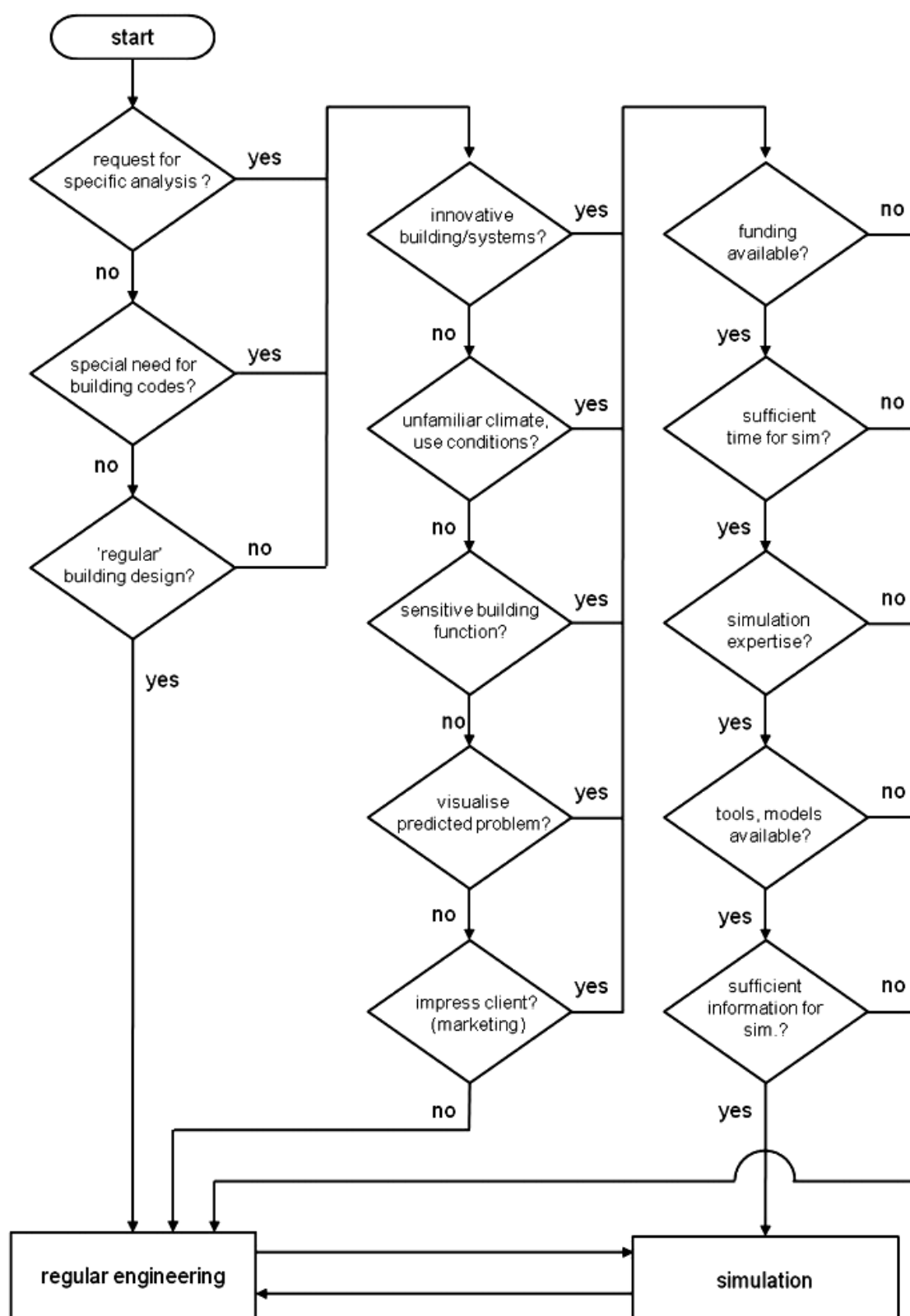


Figura 57 - Diagramma sulle scelte progettuali che portano all'esecuzione o meno delle simulazioni
(Fonte: Wilde e Prickett, 2009)

Un buon punto di partenza per la loro divulgazione consiste nella directory online gestita, e costantemente aggiornata, dal NREL accessibile all'indirizzo www.buildingtools.energy.gov. In questa pagina internet vengono elencati oltre 370 software di simulazione energetica¹⁷. In particolare nella sezione riguardante *EnergyPlus* si possono consultare i *modeler report* realizzati con questo programma per vari test di validazione.

Infine ricordiamo che in *ASHRAE Fundamentals Handbook cap. 32* [1], è inserito un paragrafo che focalizza alcuni concetti chiave sulla scelta del software di simulazione energetica da adottare per scopi professionali:

Complessità degli input (o semplicità / velocità di utilizzo). È largamente influenzato dalla presenza di valori predefiniti che possono essere impiegati in analisi semplificate o quando la progettazione dell'edificio è convenzionale. Nel caso di esigenze più dettagliate, il programma usa i valori predefiniti richiedendo solamente quelli mancanti.

Qualità dei risultati. Le relazioni finali devono essere facili e intuitive, con titoli non ambigui, unità di misura adatte, incorporando grafici e tabelle riepilogative. Inoltre, devono essere disponibili anche dei report più dettagliati e approfonditi, adatto ad un pubblico esperto.

Disponibilità dei dati meteorologici. Si deve valutare attentamente la disponibilità di database aggiornati compatibili col software considerato. Inoltre, alcuni software dispongono di specifici algoritmi per la conversione del formato dei dati meteorologici.

Funzioni ausiliarie. La presenza di funzioni aggiuntive, come quelle di analisi economica, sono importanti per la scelta finale.

Disponibilità di corsi di insegnamento.

Completezza del manuale tecnico. I risultati delle simulazioni devono sempre essere verificati da esperti, anche perché gli sviluppatori del software non si accollano alcuna responsabilità in merito. A tal proposito è bene conoscere quali algoritmi vengono usati quando si lancia una simulazione semplice o dettagliata, e quale modello matematico viene adottato in tali routine informatiche.

Un importante punto di partenza per tale scelta può essere la consultazione del file pdf¹⁸, disponibile sempre nel sito del dipartimento di energetica statunitense, che confronta diverse caratteristiche, tra cui i test di validazione superati, di 20 software considerati rappresentativi dell'attuale stato dell'arte.

¹⁷ In questa categoria rientrano: software semplificati (es. operanti solo in regime stazionario), finalizzati al solo calcolo dei carichi termici, valutazioni economiche-energetiche, analisi e dimensionamento di specifici impianti come sistemi a tutt'aria o impianti a pannelli radianti.

¹⁸ Disponibile al seguente collegamento diretto:
http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf

6 ACRONIMI

ANN	Artificial Neural Network
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BEAS	Building Energy Analysis Software
BESS	Building Energy Simulation Software
BESTEST	Building Energy Simulation Test
CABD	Computer Aided Building Design
COP	Coefficient Of Performance
CIBSE	Chartered Institute of Building Services Engineers
DOE	Unites States Department Of Energy
EDB	Entering Dry Bulb temperature
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EWB	Entering Wet Bulb temperature
HERS	Home Energy Rating System
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IEA	International Energy Agency
IEA-SHC	International Energy Agency - Solar Heating and Cooling Programme
MSE	Modular Simulation Environment
NASEO/RESNET	National Association of State Energy Officials / Residential Energy Services Network
NREL	National Renewable Energy Laboratory – Nato nel 1977 come SERI
ODB	Outdoor Dry Bulb temperature
PLR	Part Load Ratio
SERI	Solar Energy Research Institute – Dal 1991 NREL
SHR	Sensible Heat Ratio
VAV system	Variable Air Volume system

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] ASHRAE. «Energy estimating and modeling methods» Cap. 32 in *ASHRAE Handbook 2005 - Fundamentals (SI)*. 2005.
- [2] Baratta, A., Venturi L.. «Prestazioni termiche di pareti perimetrali in regime dinamico» *Costruire In Laterizio*, Num. 122 Marzo/Aprile 2008.
<http://www.laterizio.it/costruire>
- [3] Bush, Robert D. «Methods of Energy Analysis» Cap. 4 in *Fundamentals of Building Energy Dynamics*, di Bruce D. Hunn. The MIT Press, 1996.
- [4] Campioli A., Ferrari S., Lavagna M.. «Il comportamento energetico-ambientale di involucri in laterizio» *Costruire In Laterizio*, Num. 120 Novembre/Dicembre 2007.
<http://www.laterizio.it/costruire>
- [5] Clarke, J. A. *Energy Simulation in Building Design (2nd edition)*. Butterworth Heinemann, 2001.
- [6] ESRU - University of Strathclyde in Glasgow. *Building Energy Modelling and Simulation Self-learning Modules*. (periodo di consultazione: Settembre 2009).
http://www.esru.strath.ac.uk/Courseware/Building_modelling/index.htm
- [7] Hand, J W. «Removing barriers to the use of simulation in the building design professions» PhD Thesis. *ESRU - University of Strathclyde in Glasgow*. Novembre 1998.
http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/PhD/hand_thesis.pdf
- [8] Hayez, S., Dalibart, C., Guyon, G., Feburie, J.. «HVAC BESTEST: Clim2000 and CA-SIS Results » *Proceeding of Building Simulation*. Agosto 2001.
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2001/BS01_1127_1134.pdf
- [9] Judkoff, Ron. «Final Task Management Report» *IEA SHC 34 / ECBCS Annex 43*. Maggio 2008.
http://www.iea-shc.org/publications/downloads/task34-Final_Mgmt_Report.pdf
- [10] Judkoff, R. e J. Neymark. «International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method» NREL/TP-472-6231 *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO*. Febbraio 1995
<http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6231.pdf>
<http://www.iea-shc.org/task22/publications/6231.pdf>
- [11] Judkoff, R. e J. Neymark. «Home Energy Rating System Building Energy Simulation Test (HERS BESTEST)» Volume 1. NREL/TP-472-7332a *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO*. Novembre 1995
<http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy96/7332a.pdf>
- [12] Judkoff, R. e J. Neymark. «Home Energy Rating System Building Energy Simulation Test (HERS BESTEST)» Volume 2. NREL/TP-472-7332b *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO*. Novembre 1995
<http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy96/7332b.pdf>

- [13] Judkoff, R. e J. Neymark. «Model Validation and Testing: The Methodological Foundation of ASHRAE Standard 140» NREL/CP-550-40360 *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.* Luglio 2006.
<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/40360.pdf>
- [14] Judkoff, R. e J. Neymark. «What did they do in IEA 34/43? Or how to diagnose and repair bugs in 500000 lines of code» *Proceeding of Building Simulation.* Luglio 2009.
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1091_1098.pdf
- [15] Judkoff, R., B. Wortman, B. O'Doherty, e J. Burch. «A Methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations» NREL/TP-550-42059 *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.* Aprile 2008. Questa è una pubblicazione del lavoro pubblicato come bozza finale nel 1983 e riportato in bibliografia in numerosi documenti come SERI/TR-254-1508. I due documenti sono identici salvo alcune modifiche minori per completare la bozza precedente.
<http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42059.pdf>
- [16] Medola, Matteo. «Analisi delle prestazioni termiche dell'involucro in laterizio valutate in regime dinamico nel "sistema-edificio" in un contesto climatico mediterraneo» *Sito Web del Consorzio Alveolater.* Dicembre 2006.
<http://www.alveolater.com/ricerche/termica/relazione0207.pdf>
- [17] Medola, Matteo. «Prestazioni termiche» *Costruire In Laterizio*, Num. 118 Luglio/Agosto 2007.
<http://www.laterizio.it/costruire>
- [18] Neto, A. H., e Fiorelli F. A. S.. «Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption» *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 12, Pages 2169-2176. 2008
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778808001448>
- [19] Neymark, J. e R. Judkoff. «International Energy Agency Building Energy Simulation Test and diagnostic method for heating, ventilating, and air-conditioning equipment models (HVAC BESTEST), vol. 1: Cases E100-E200» NREL/TP-550-30152 *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.* Gennaio 2002.
<http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/30152.pdf>
- [20] Neymark, J. e R. Judkoff. «International Energy Agency Building Energy Simulation Test and diagnostic method for heating, ventilating, and air-conditioning equipment models (HVAC BESTEST), vol. 2: Cases E300-E545» NREL/TP-550-36754 *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.* Dicembre 2004.
<http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/36754.pdf>
- [21] Neymark, J., Judkoff, R., et al.. «International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST) In-Depth diagnostic cases for Ground Coupled heat transfer related to Slab-On-Grade construction» NREL/TP-550-43388 *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.* Settembre 2008.

- <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43388.pdf>
http://www.iea-shc.org/publications/downloads/task34-Building_Energy_Simulation_Test.pdf
- [22] Neymark, J., Judkoff, R., et al.. «IEA BESTEST in-depth diagnostic cases for ground coupled heat transfer related to slab-on-grade construction» *Proceeding of Building Simulation*. Luglio 2009.
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1099_1106.pdf
<http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45742.pdf>
- [23] Neymark, J., Judkoff R., Knabe G., Le H.-T., During M., Glass A., Zweifel G.. «HVAC BESTEST: a procedure for testing the ability of whole-building energy simulation programs to model space conditioning equipment» *Proceeding of Building Simulation*. Agosto 2001.
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2001/BS01_0369_376.pdf
<http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/29828.pdf>
- [24] Neymark, J., Judkoff R., Knabe G., Le H.-T., During M., Glass A., Zweifel G.. «Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs» *Energy and Buildings*. Volume 34, Issue 9, Pages 917-931. Ottobre 2002.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778802000725>
- [25] Neymark, J., Judkoff R., Knabe G., Le H.-T., During M., Glass A., Zweifel G.. «An analytical verification procedure for testing the ability of whole-building energy simulation programs to model space conditioning equipment (HVAC BESTEST)» *Presentazione per ASHRAE Symposium, Honolulu, Hawaii*. Giugno 2006.
http://tc47.ashraetcs.org/pdf/Presentations/Neymark_Honolulu.pdf
- [26] Tuomaala, Pekka. «Implementation and evaluation of air flow and heat transfer routines for building simulation tools» *VTT Technical Research Centre of Finland*. 2002.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2002/P471.pdf>
- [27] UNI EN ISO 13791:2005. «Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione - Criteri generali e procedure di validazione»
- [28] UNI EN ISO 13792:2005. «Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione - Metodi semplificati»
- [29] UNI EN 15255:2008. «Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del carico sensibile di raffrescamento di un ambiente - Criteri generali e procedimenti di validazione»
- [30] UNI EN 15265:2008. «Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti mediante metodi dinamici - Criteri generali e procedimenti di validazione»
- [31] Wilde, P. e D. Prickett. «Preconditions for the use of simulation in M&E Engineering» *Proceeding of Building Simulation*. Luglio 2009.
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0414_419.pdf

- [32] Zweifel, G. e M. Achermann. «RADTEST – Radiant Heating and Cooling Test Cases» *A report of IEA Task 22, Subtask C.* Aprile 2003.
http://www.iea-shc.org/task22/publications/RADTEST_final.pdf
- [33] Zweifel, G. e M. Achermann. «RADTEST – The extension of program validation towards radiant heating and cooling» *Procedeeing of Building Simulation.* Agosto 2003.
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03_1505_1512.pdf
- [34] Zweifel, Gerhard. «New EPBD related standards and their relation to building and HVAC system simulation» *Procedeeing of Building Simulation.* 2007.
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p440_final.pdf